

УДК 53:620.2  
ББК 22.3+30.609  
Ф 48

Авторы-составители: Л. С. Корецкая, д-р техн. наук, профессор;  
Е. В. Черненко, ассистент

Рецензенты: Т. И. Александрова, канд. техн. наук, доцент  
Гомельского государственного технического  
университета им. П. О. Сухого;  
Г. С. Митюрин, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Белорусского торгово-экономического университета  
потребительской кооперации

Рекомендован к изданию научно-методическим советом учреждения образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации». Протокол № 4 от 9 апреля 2013 г.

**Физика.** Физические основы сырья и материалов : практикум для реализации содержания образовательных программ высшего образования I ступени / авт.-сост. : Л. С. Корецкая, Е. В. Черненко. – Гомель : учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации», 2014. – 144 с.  
ISBN 978-985-540-171-2

Издание предназначено для студентов специальностей 1-25 01 09 «Товароведение и экспертиза товаров», 1-25 01 10 «Коммерческая деятельность», 1-25 01 14 «Товароведение и торговое предпринимательство» специализации 1-25 01 14 02 «Товароведение и организация торговли продовольственными товарами».

Практикум предполагает глубокое изучение физических основ сырья и материалов и выработку навыков экспериментальной работы.

УДК 53:620.2  
ББК 22.3+30.609

ISBN 978-985-540-171-2

© Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации», 2014

## **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

Практикум для лабораторных работ по дисциплинам «Физика», «Физические основы сырья и материалов» составлен в соответствии с требованиями учебного плана и программой дисциплин.

Целью преподавания указанных дисциплин является формирование у студентов знаний об основных физических законах и закономерностях, лежащих в основе методов исследования различных потребительских свойств товаров, научного мировоззрения и современного представления о физических законах развития мироздания.

Предлагаемый практикум окажет помощь студентам в решении следующих задач:

- экспериментальном изучении основных физических понятий, законов и явлений;
- приобретении навыков экспериментальной работы;
- ознакомлении с физическими методами качественного и количественного анализа веществ;
- усвоении методик проведения физического эксперимента по оценке качества непродовольственных и продовольственных товаров и приобретении навыков их использования;
- выработке навыков решения конкретных задач по физическим основам товароведения продовольственных и непродовольственных товаров;
- изучении на практике физических явлений и процессов, протекающих при производстве, хранении, реализации товаров и т. д.

В каждой лабораторной работе представлены краткие теоретические сведения где описываются устройство и принцип работы установок, задания и порядок их выполнения, а также вопросы для самоконтроля.

В зависимости от сложности лабораторные работы выполняются в течение 2–4 аудиторных часов.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Положения и выводы в физике непосредственно связаны с экспериментом. Как и в любой точной науке, в физике результаты экспериментов представляются чаще всего *числовыми значениями физических величин*, т. е. теми числовыми значениями, которые входят в математические формулы, устанавливающие связи между физическими величинами в явлениях природы.

Одна из целей лабораторного практикума – научиться правильно измерять физические величины и правильно использовать их числовые значения в формулах.

Измерить физическую величину – значит сравнить ее с однородной величиной, принимаемой за эталонную. *Единицы измерения* выбираются произвольно, но если они выбраны, то должны оставаться неизменными в пределах выбранной системы единиц.

*Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных измерительных средств (приборов).

Различают прямые, косвенные и совместные измерения.

*Прямыми* называются измерения, при которых искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных путем оценки и сравнения.

*Косвенными* называются измерения, при которых искомое значение физической величины определяют на основании известной математической зависимости между этой физической величиной и результатами прямых измерений.

При *совместных* измерениях одновременно выполняются измерения нескольких (двух и более) разноименных физических величин для нахождения зависимости между этими физическими величинами.

Любое измерение сопровождается *погрешностью*, т. е. отклонением результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины, вызванным принципиальной невозможностью устранить все посторонние влияния на процесс измерения.

Все возможные погрешности измерений по природе происхождения разделяются на грубые (промахи), систематические и случайные.

*Грубые погрешности (промахи)* возникают в результате резкого нарушения условий измерения, просчета (ошибки) экспериментатора или неисправности средств измерения. Признаком появления промаха является значительное отличие результата измерения от остальных результатов измерений. При появлении промаха необходимо повторить измерение, а результат, содержащий промах, исключить из се-

рии величин измерения. Результаты при дальнейшей математической обработке не должны включать промахи.

*Систематические погрешности* возникают вследствие несовершенства измерительных приборов и недостатков методик измерения. Они всегда дают отклонение результата измерения от истинного значения в одну и ту же сторону. Систематические погрешности не зависят от числа измерений и поддаются исключению или учету путем применения более точных приборов и совершенных методик измерения.

*Случайные погрешности* – это погрешности измерения, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же физической величины. Они могут изменять результат измерения в обе стороны, увеличивая или уменьшая его. Случайные погрешности не могут быть исключены из результатов измерений, но при определенном числе повторных измерений могут быть учтены, если известны числовые характеристики закона распределений случайных погрешностей измерений. Эти числовые характеристики устанавливают связь между истинным значением физической величины и значениями величины, полученными путем измерений. Такого рода связь определяет вероятность того, что истинное значение физической величины находится внутри определенного интервала значений этой физической величины.

Основной задачей методов математической обработки результатов измерений является получение после многократных измерений физической величины приближенного значения истинной величины и вычисление погрешности, с которой это значение получено.

По форме числового представления различают абсолютные, относительные и приведенные погрешности.

За *истинное значение физической величины* принимают среднее арифметическое значение как наиболее вероятное значение измеряемой величины. Так как случайные погрешности измерений с равной степенью вероятности могут давать отклонения от измеряемой величины как в меньшую, так и в большую сторону, то при достаточном количестве измерений они могут взаимно компенсироваться. В таком случае наиболее вероятным значением физической величины будет *среднее арифметическое* всех проведенных измерений, исчисляемое по формуле

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое отдельных измерений;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – результаты отдельных измерений;

$n$  – число измерений;

$\sum_{i=1}^n x_i$  – сумма всех отдельных измерений.

Величина  $x$  стремится к истинному значению ( $x_0$ ) измеряемой величины при  $n \rightarrow \infty$ .

Степень приближения физической величины к истинному значению определяется *абсолютной погрешностью*, т. е. величиной, показывающей насколько найденное численное значение отличается от истинного значения измеряемой величины. Абсолютная погрешность исчисляется как разность между результатами измерения величины и ее истинным значением, выраженная в единицах измерения, по формуле

$$\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|,$$

где  $\Delta x_i$  – абсолютная погрешность отдельного измерения;

$x_i$  – результаты отдельных измерений.

При многократных измерениях физической величины вводится понятие средней абсолютной погрешности отдельного измерения.

Под *средней абсолютной погрешностью отдельного измерения* понимают среднее арифметическое из всех величин отклонений каждого отдельного измерения от среднего арифметического. Если обозначить величины отклонений (абсолютную погрешность) формулами  $\Delta x_1 = \bar{x} - x_1$ ,  $\Delta x_2 = \bar{x} - x_2$ , ...,  $\Delta x_n = \bar{x} - x_n$ , то средняя абсолютная погрешность отдельного измерения в серии из  $n$  измерений ( $\overline{\Delta x}$ ) выразится следующим образом:

$$\overline{\Delta x} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n},$$

где  $|\Delta x_1|, |\Delta x_2|, \dots, |\Delta x_n|$  – абсолютные значения отклонения от среднего арифметического, т. е. с положительными знаками.

Однако абсолютная погрешность еще не характеризует точность

измерений, поэтому для сравнения точности различных измерений вводится понятие относительной погрешности результата измерения.

*Относительной погрешностью измерения* ( $\varepsilon$ ) называется отношение абсолютной погрешности измерения величины к самой измеряемой величине, показывающее, какую долю измеренной величины составляет абсолютная погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}.$$

При многократных измерениях одной величины относительная погрешность этой серии измерений выражается в процентах и определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \cdot 100\%,$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение измеренной величины.

На практике часто требуется определить погрешности при однократных измерениях (отсчетах) по шкалам измерительных приборов. В этом случае абсолютная погрешность определяется *по приведенной погрешности* – классу точности измерительного прибора ( $\delta$ ) по формуле

$$\Delta x = \delta \cdot x_{\max},$$

где  $x_{\max}$  – предельное значение шкалы измерительного прибора.

Если класс точности прибора неизвестен, но дана *цена деления* его шкалы, т. е. значение измеряемой величины, соответствующее наименьшему делению шкалы, то за *величину абсолютной погрешности* отсчета можно принять *половину цены наименьшего деления шкалы*.

При обработке результатов *прямых измерений* используется следующий порядок вычислительных операций:

1. Составляется таблица результатов измерений.
2. Результаты каждого измерения ( $x_i$ ) заносятся в эту таблицу.
3. Исчисляется среднее арифметическое из  $n$  измерений по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

4. Определяются абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}.$$

5. Исчисляется средняя абсолютная погрешность измерений по формуле

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}.$$

6. Вычисляется относительная погрешность среднего арифметического следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

7. Представляется окончательный результат ( $x_{окон}$ ) измерения в следующем виде:

$$x_{окон} = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}.$$

При вычислениях окончательного результата и оценке его погрешностей следует руководствоваться следующими правилами:

- Погрешность при вычислении окончательного результата должна быть примерно в 10 раз меньше суммарной абсолютной погрешности измерения искомой величины.

- Не следует приводить величину относительной погрешности с точностью менее 10%. Можно ограничиться только одной значащей цифрой.

При расчетах и вычислениях необходимо пользоваться табличными данными, где указываются значения основных физических постоянных величин, единицы измерения и другие справочные данные (приложения А–В).

## **ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ**

Раздел, тема	Количество часов
<i>Физические основы механики</i>	
1. Изучение методики определения линейных размеров по шкале с нониусом	4
2. Изучение силы трения	4
3. Определение модуля упругости (модуля Юнга) по изгибу стержня	4
4. Определение момента инерции махового колеса	4
5. Определение ускорения силы тяжести при помощи обратного маятника	4
6. Определение длины волны и скорости распространения звуковых колебаний	4
<i>Молекулярная физика и термодинамика</i>	
7. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса	4
8. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	4
9. Определение влажности воздуха	4
10. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха	4
11. Определение плотности материалов	2
<i>Электростатика и электрический ток. Электромагнетизм</i>	
12. Изучение электроизмерительных приборов	4
13. Изучение закона Ома для постоянного и переменного тока	4
14. Изучение электронного осциллографа, получение фигур Лиссажу	4
15. Определение емкости конденсатора при помощи моста Сотти	2
<i>Волновая и квантовая оптика</i>	
16. Определение показателя преломления твердых тел и линейных размеров малых объектов с помощью микроскопа	4
17. Определение концентрации раствора спирта рефрактометром	4
18. Изучение внешнего фотоэффекта	4
<i>Элементы физики атома и атомного ядра</i>	
19. Измерение мощности полевой эквивалентной дозы гамма-излучения	4



20. Измерение удельной активности радионуклида цезия-137 в водном растворе дозиметром-радиометром РКС-107	4
Итого	76

## **ЗАДАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ, ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**

#### **Лабораторная работа 1**

#### **Изучение методики определения линейных размеров по шкале с нониусом**

**Цель работы:** ознакомиться с методами измерения линейных величин, научиться оценивать точность измерений, приобрести навыки определения абсолютной и относительной погрешностей искомых величин.

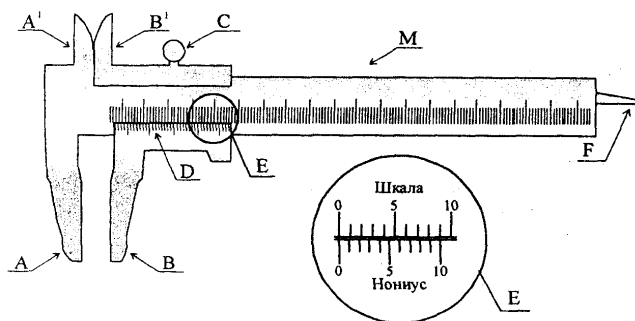
#### **Материальное обеспечение**

1. Штангенциркуль.
2. Микрометр.
3. Образцы для измерений.

#### **Теоретические сведения**

Измерение линейных величин можно осуществить с помощью таких приборов, как штангенциркуль и микрометр.

Штангенциркуль (рисунок 1) применяют для измерения наружных и внутренних размеров тел, а также глубины отверстий. Штангенциркули бывают с точностью измерения 0,1; 0,05 и 0,02 мм.



*Условные обозначения:*

AA' – неподвижная щека; BB' – подвижная щека;

С – зажимной винт; D – рамка; F – рейка;  
M – миллиметровая линейка; E – нониус.

Рисунок 1 – Схема устройства штангенциркуля и шкалы с нониусом

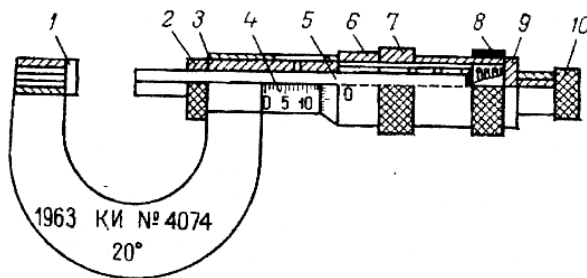
Перед началом измерений нужно определить точность нониуса. Для этого совмещают нуль шкалы нониуса с каким-либо делением основной шкалы и определяют номер следующего штриха нониуса, совпадающего с другим целым делением основной шкалы. Если этот номер равен  $n$ , то точность нониуса определяется как  $1/n$  (самого наименьшего деления основной шкалы). На нониусе  $n$ -е деление всегда оцифровано.

Штангенциркуль состоит из штанги (см. рисунок 1), которая представляет собой линейку с основной миллиметровой шкалой M, и губок A и A'. Вдоль штанги может перемещаться рамка D с губками B и B' и глубиномером F. Рамка D фиксируется на штанге винтом С.

Размеры тела определяют путем отсчета по основной шкале в целых миллиметрах и нониусу на рамке D в десятых долях миллиметра. Число целых миллиметров берут по основной шкале до нулевого штриха нониуса, а число десятых долей – по штриху нониуса, который совпадает с каким-либо штрихом основной шкалы.

Для более точных измерений применяют микрометрические инструменты. Они бывают нескольких типов: микрометр для наружных измерений (рисунок 2), микрометрический глубиномер, микрометрический нутромер.

Микрометрический винт дает возможность более точно отсчитывать мелкие доли деления основной шкалы, чем линейный нониус.



Условные обозначения:

- 1 – неподвижная скоба с измерительной плоскостью; 2 – втулка микровинта;
- 3 – стопорная гайка; 4 – линейная шкала стебля скобы; 5 – барабан; 6 – резьбовая втулка; 7 – гайка для компенсации износа резьбы; 8 – микрометрический винт;
- 9 – трещотка для создания постоянного давления; 10 – головка трещотки.

Рисунок 2 – Схема устройства микрометра

Микрометр состоит из двух основных частей: скобы с измерительной плоскостью (1) и микрометрического винта (8), на котором закреплен барабан (5) с делениями по окружности. Микрометрический винт представляет собой стержень с точной винтовой нарезкой. Высота подъема винтовой нарезки за один оборот называется шагом микрометрического винта. Он составляет 0,5 мм, так как для того, чтобы микрометрический винт передвинулся на 1 мм, необходимо сделать два оборота барабана. При вращении винта барабан скользит по линейной шкале стебля скобы (4). Верхние и нижние риски шкалы сдвинуты относительно друг друга на 0,5 мм; цифры поставлены только для делений нижней шкалы.

Измерения микрометром проводят следующим образом: помещают предмет между измерительной плоскостью скобы (1) и втулкой (2), вращают микровинт за головку трещотки (10) до появления характерного звукового сигнала.

Цена деления шкалы барабана может быть установлена в нижнем приведенном порядке. Пусть число делений ( $n$ ) круговой шкалы барабана равно 50, шаг микровинта ( $h$ ) – 0,5 мм. Следовательно, одному полному обороту микровинта (и барабана) соответствует линейное перемещение края барабана ( $a$ ) на 0,5 мм. При этом цена деления круговой шкалы барабана равна 0,01 мм ( $h : n = 0,5 : 50$ )

Отсчет производится следующим образом: по горизонтальной шкале стержня отсчитывается размер измеряемого предмета с точностью до 0,5 мм. Сотые доли миллиметра отсчитываются по круговой шкале барабана. Полученные результаты складываются. Число сотых долей соответствует делению шкалы, расположенному против продольной черты на шкале. Порядок отсчета одинаков для всех типов микрометрических инструментов.

В нашем примере (рисунок 3) на шкале стебля установлен размер 8,5 мм. Круговая шкала барабана поделена на 50 частей, которые соответствуют 0,01 мм. Если барабан повернется дальше на одно деление, то шпindel продвинется продольно на 0,01 мм. Нониус барабана стоит на делении 0,27 мм (27 : 100), совпадающим с горизонтальным указательным штрихом шкалы стебля. Общий размер измеряемого изделия, таким образом, будет равен:  $8,5 + 0,27 = 8,77$  мм.

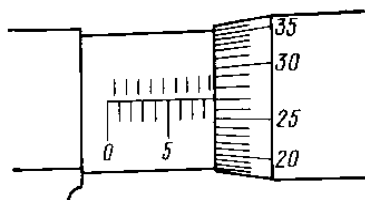


Рисунок 3 – Делительный барабан и делительная втулка микрометра  
**Задание: Определение линейных размеров образцов с помощью штангенциркуля и микрометра**

Задание выполните в следующем порядке:

1. С помощью штангенциркуля измерьте внешние размеры параллелепипеда.
2. Измерьте штангенциркулем внешние размеры цилиндра.
3. Измерьте внешние размеры усеченного конуса, используя штангенцикуль и микрометр.
4. Измерьте внешние размеры кольца с помощью микрометра и штангенциркуля.
5. Определите микрометром размер диаметра шара.
6. Повторите измерения каждой величины 3 раза.
7. На основании полученных результатов рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений, среднюю абсолютную и относительную погрешности.
8. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты определения диаметра ( $d$ ) образцов

Номер образца	$d$ , мм	$\bar{d}$ , мм	$\Delta d$ , мм	$\overline{\Delta d}$ , мм	$\varepsilon$ , %
------------------	----------	----------------	-----------------	----------------------------	-------------------

6. Сформулируйте вывод и рассчитайте окончательный результат, используя формулу

$$d = \bar{d} \pm \overline{\Delta d}. \quad (1.1)$$

**Вопросы для самоконтроля**

1. Что называется ценой деления масштабной линейки?
2. Для чего служит нониус?
3. Как производятся измерения наружных и внутренних размеров тел штангенциркулем?
4. Что называется ценой деления нониуса?
5. Как устроен микрометр? Каким образом производятся измерения при помощи микрометра?

6. Чему равна точность измерения штангенциркулем?
7. Чему равна точность измерения микрометром?
8. Что представляют собой систематические ошибки измерений?
9. Какие ошибки при измерениях называют случайными?

## **Лабораторная работа 2**

### **Изучение силы трения**

**Цель работы:** ознакомиться с экспериментальным методом исследования факторов, влияющих на значение силы трения, научиться определять коэффициент трения покоя и коэффициент трения скольжения; овладеть экспериментальным методом проверки соотношения между ускорением движения системы двух связанных тел, ее массой и внешними силами, действующими на нее.

### ***Материальное обеспечение***

1. Прибор с принадлежностями для изучения законов механики.
2. Секундомер.
3. Оптоэлектрические датчики.

### ***Теоретические сведения***

Силы трения возникают благодаря существованию сил взаимодействия между молекулами и атомами соприкасающихся тел.

*Внешним трением* называется взаимодействие, возникающее между соприкасающимися поверхностями твердых тел. Под *внутренним трением* понимается взаимодействие, возникающее между поверхностью твердого тела и слоями жидкости или газа при их относительном движении.

*Силами трения* называют силы, характеризующие взаимодействие соприкасающихся поверхностей двух тел и препятствующие их взаимному перемещению. Силы трения приложены к телам вдоль поверхностей их соприкосновения и всегда направлены в сторону, противоположную относительной скорости движения тел.

Существуют три вида внешнего трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

Если относительная скорость соприкасающихся поверхностей тел равна нулю, то говорят о *трении покоя*, обусловленным в основном упругими деформациями микровыступов. Сила трения покоя ( $F_{\text{покоя}}$ ) направлена противоположно приложенной вдоль линии возможного движения «смещающей» силе, а ее модуль равен модулю «смещаю-

щей» силы и может принимать значения от нуля до  $F_{\max}$ . Максимальная сила трения покоя ( $F_{\max \text{ покоя}}$ ) определяется по формуле

$$F_{\max \text{ покоя}} = \mu_0 N, \quad (2.1)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент трения покоя;

$N$  – сила нормального давления.

Если относительная скорость поступательного движения соприкасающихся тел не равна нулю, то имеет место *трение скольжения*, возникающее в результате пластических деформаций микровыступов и их частичного разрушения. Силы трения скольжения зависят от природы вещества соприкасающихся поверхностей, степени их шероховатости, силы нормального давления и относительной скорости тел (незначительно).

Согласно экспериментально установленному закону Кулона – Амонтона модуль силы трения скольжения пропорционален модулю силы нормального давления одного тела на другое и рассчитывается по формуле

$$F = \mu N, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

Модуль силы трения скольжения всегда меньше модуля максимальной силы трения покоя, т. е.  $\mu_0 > \mu$ . Однако если различие между этими двумя силами мало, то можно считать, что  $\mu_0 = \mu$ .

При движении тела массой  $m$  по *наклонной плоскости*, образующей угол  $\alpha$  с горизонтом, модуль силы трения скольжения ( $F_{ск}$ ) вычисляется следующим образом:

$$F_{ск} = \mu mg \cos \alpha, \quad (2.3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Согласно второму закону Ньютона сила трения скольжения исчисляется по формуле

$$ma = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha. \quad (2.4)$$

Исходя из этого модуль ускорения тела рассчитывается по формуле

$$a = g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha. \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) следует, что коэффициент трения скольжения равен

$$\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}, \quad (2.6)$$

где  $a$  – ускорение тела.

При равномерном движении тела по наклонной плоскости ( $\vec{a} = \vec{0}$ ) коэффициент трения скольжения рассчитывается следующим образом:  $\mu = \tan \alpha$ .

При движении по *горизонтальной поверхности* тела массой  $m_2$ , связанного нитью, перекинутой через неподвижный блок, с грузом массой  $m_1$  модуль ускорения системы тел согласно второму закону Ньютона будет равен:

$$(m_1 + m_2)a = mg - F_{mp}, \quad (2.7)$$

где  $F_{mp}$  – модуль силы трения скольжения.

При движении тела по горизонтальной поверхности модуль силы трения скольжения исчисляется по следующей формуле:

$$F_{mp} = \mu m_2 g. \quad (2.8)$$

Из выражений (2.7) и (2.8) следует:

$$(m_1 + m_2)a = (m_1 - \mu m_2)g. \quad (2.9)$$

Если тело движется равноускоренно, то коэффициент трения скольжения выражается формулой

$$\mu = \frac{m_1}{m_2} - \frac{(m_1 + m_2)a}{m_2 g}. \quad (2.10)$$

При равномерном движении коэффициент трения скольжения равен:

$$\mu = \frac{m_1}{m_2}. \quad (2.11)$$

### ***Задание 1. Определение коэффициента трения скольжения***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с установкой для выполнения опыта (рисунок 4).
2. Вставьте стержень с флажком в отверстие, расположенное на боковой грани тела с различными поверхностями трения, а второй стержень – в отверстие на верхней грани тела.

3. Измерьте длину флажка бокового стержня ( $d$ ).
4. Взвешиванием определите массу тела ( $m_2$ ) вместе со стержнями и среднюю массу ( $\langle m_0 \rangle$ ) одной шайбы.

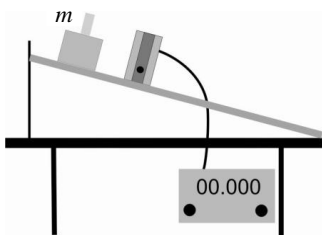


Рисунок 4 – Схема установки для определения коэффициента трения скольжения

5. Установите тело на наклонной поверхности желоба и убедитесь, что оно может свободно перемещаться по направляющим желоба.
6. Положите на тело некоторое количество шайб и освободите тело. В случае, если тело не движется, уменьшите число шайб и вновь проверьте движение системы. Повторяйте это действие до тех пор, пока тело не начнет двигаться.
7. Установите оптический датчик на наклонной части основания таким образом, чтобы его основание (магнит) соприкасалось с металлической линейкой на верхней стороне основания прибора. Убедитесь, что флажок бокового стержня проходит через створ оптического датчика.
8. Подсоедините оптический датчик к гнезду 1 секундомера, установите прибор в режим *One*.
9. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика (прошел путь, равный собственной длине) после освобождения тела (см. рисунок 3).
10. Рассчитайте модуль скорости тела в тот момент, когда флажок проходит через створ датчика, при различных положениях датчика и убедитесь в том, что тело движется равномерно. Если тело двигалось равноускоренно и значения модулей скорости, полученные при различных положениях датчика, значительно отличаются друг от друга, рассчитайте модуль ускорения тела по формуле

$$a = \frac{2d}{\Delta t^2}, \quad (2.12)$$



где  $\Delta t^2$  – промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика.

11. Повторите измерения для других поверхностей трения и при других значениях массы тела.

12. Используя результаты измерений и вычислений, рассчитайте коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения:

- по формуле  $\mu = \operatorname{tg} \alpha$ , если движение было равномерным;
- по формуле (2.6) – при равноускоренном движении тела.

13. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Результаты измерения трения скольжения

$d$ , м	$m_2$ , кг	$\langle m_0 \rangle$ , кг	$m_1$ , кг	$m_1 + m_2$ , кг	$\Delta t$ , с	$v$ , м/с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$\mu$
---------	------------	----------------------------	------------	------------------	----------------	-----------	------------------------	-------

14. Сформулируйте вывод.

## ***Задание 2. Изучение закономерностей движения системы связанных тел***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с установкой для выполнения опыта (рисунок 5).

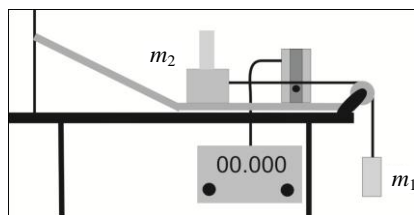


Рисунок 5 – Схема установки для изучения закономерностей движения системы связанных тел

2. Установите основание прибора горизонтально. Вставьте первый стержень в отверстие, расположенное на верхней грани тела с различными поверхностями трения, а стержень с флажком – в отверстие на боковой грани тела.

3. Измерьте длину ( $d$ ) флажка на боковом стержне и запишите данные.

4. Взвешиванием определите массу тела ( $m_2$ ) вместе со стержнями, среднюю массу ( $\langle m_0 \rangle$ ) одной шайбы и массу подставки ( $m_3$ ) для раз-

мещения шайб. Массу тела ( $m_1$ ) исчислите по формуле

$$m_1 = m_3 + n\langle m_0 \rangle, \quad (2.13)$$

где  $n$  – число разновесов, помещенных на подставку.

5. Установите тело на поверхности желоба и убедитесь, что выступ на поверхности тела может свободно перемещаться по направляющим желоба. Перекиньте шнур, соединяющий тело и подставку для шайб, через блок.

6. Положите на подставку несколько шайб и освободите тело. Если тело не движется, увеличьте число шайб на подставке и вновь проверьте характер движения системы. Повторяйте это действие до тех пор, пока система не начнет двигаться равномерно.

7. Установите оптический датчик таким образом, чтобы магнит на его основании касался металлической линейки, закрепленной на верхней стороне основания прибора. Убедитесь, что флажок бокового стержня проходит через створ оптического датчика.

8. Подсоедините оптический датчик к гнезду 1 секундомера, установите прибор в режим *One*.

9. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика (прошел путь, равный собственной длине) после освобождения тела, при различных положениях датчика.

10. Рассчитайте модуль скорости системы в тот момент, когда флажок проходит через створ датчика, и убедитесь, что тело движется равномерно.

11. Повторите измерения для других поверхностей трения и при других значениях масс груза ( $m_1$ ) и тела ( $m_2$ ).

12. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Результаты измерений

$d$ , м	$m_2$ , кг	$\langle m_0 \rangle$ , кг	$m_1$ , кг	$m_1 + m_2$ , кг	$\Delta t$ , с	$v$ , м/с	$\mu$
---------	------------	----------------------------	------------	------------------	----------------	-----------	-------

13. Используя результаты измерений и вычислений, рассчитайте коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения по формуле (2.11).

14. Сформулируйте вывод.

### **Задание 3. Изучение равноускоренного движения тел**

Задание выполните по аналогии с предыдущим (см. задание 2.).

Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика. Рассчитайте модуль ускорения тела по формуле (2.12) и коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения по формуле (2.10).

Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 4. Сформулируйте вывод.

Таблица 4 – Результаты измерений при равноускоренном движении тела

$d$ , м	$m_2$ , кг	$\langle m_0 \rangle$ , кг	$m_1$ , кг	$m_1 + m_2$ , кг	$\Delta t$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$\mu$
---------	------------	----------------------------	------------	------------------	----------------	------------------------	-------

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют силой трения? В каких единицах она измеряется?
2. Какие виды трения существуют?
3. Как формулируется закон Кулона – Амонтона?
4. Что называют внешним трением?
5. Какова природа внутреннего трения?
6. Как трактуется второй закон Ньютона?

### **Лабораторная работа 3** **Определение модуля упругости** **(модуля Юнга) по изгибу стержня**

**Цель работы:** на примере измерения модуля Юнга усвоить понятия деформации и упругости; ознакомиться с явлением изгиба упругого стержня, неподвижно закрепленного одним концом, приобрести навыки измерения стрелы прогиба стержня и вычисления модуля упругости материала стержня по измеренным данным.

### ***Материальное обеспечение***

1. Прибор прогиба типа ФП-3А.
2. Микрометр или штангенциркуль.
3. Стрелочный индикатор перемещения.
4. Масштабная линейка.

### ***Теоретические сведения***

Изменение формы или объема тела под действием внешних сил называется *деформацией*. Деформации могут быть упругими и пластическими.

Деформации, полностью исчезающие после прекращения действия внешних сил, называют *упругими*. При других деформациях тела восстанавливают свою форму.

Деформации, которые не исчезают после прекращения действия внешних сил, называют *пластическими*. При таких деформациях тела не восстанавливают свою первоначальную форму, так как смещения атомов или молекул внутри них могут во много раз превышать расстояние между ними. Пластическую деформацию могут испытывать, например, глина, воск, свинец, пластилин.

Любые деформации твердых тел можно отнести к двум видам: *растяжения (сжатия)* и *сдвига*.

*Деформацию растяжения* испытывают тросы подъемных кранов и буксирные тросы, канаты, цепи в подъемных устройствах, струны музыкальных инструментов. *Деформацию сжатия* испытывают стены, столбы, фундаменты зданий, ножки скамейки и т. д.

Деформацию, при которой происходит смещение слоев тела друг относительно друга, называют *деформацией сдвига*. Деформацию сдвига испытывают балки в местах опор, болты и заклепки, скрепляющие детали. При работе ножниц, долота, зубьев происходит *срез*, т. е. сдвиг на большие углы, приводящий к разрушению.

Более сложные виды деформаций – *изгиб* и *кручение* – можно объяснить неоднородным сжатием (растяжением) и сдвигом.

Изгиб испытывают балки перекрытий в зданиях и мостах, сиденья скамеек. При изгибе одна сторона (выпуклая) подвергается растяжению, а другая (вогнутая) – сжатию.

Внутри изгибаемого тела расположен слой, не испытывающий ни растяжения, ни сжатия, называемый *нейтральным*. Таким образом, *изгиб* – это деформация, сводящаяся к растяжению (сжатию), различному в разных частях тела.

*Сила упругости* – это сила, возникающая при деформации тел и направленная в сторону, противоположную перемещению частиц тела при деформации.

Сила упругости ( $(F_{упр})_x$ ), возникающая при деформации тела, пропорциональна удлинению тела и направлена противоположно направлению перемещения частиц тела относительно других частиц при деформации (закон Гука). Математически запись данного закона выра-

жается формулой

$$(F_{уп})_x = -kx, \quad (3.1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый *жесткостью тела* (знак « $\rightarrow$ » означает, что сила упругости всегда направлена в сторону, противоположную деформации).

Если упругий стержень прямоугольного сечения неподвижно закреплен одним концом, а другой конец стержня нагружен грузом, то стержень прогнется. При этом верхние слои стержня будут растягиваться, нижние – сжиматься, а некоторый средний (нейтральный) слой, сохранит первоначальную длину и только претерпит искривление.

Перемещение ( $d$ ), которое получит свободный конец стержня, называется *стрелой прогиба*. Стрела прогиба будет тем больше, чем больше нагрузка ( $P$ ). Величина стрелы прогиба зависит от формы, размера и материала стержня, который характеризуется модулем упругости ( $E$ ). Для стержня длиной  $L$ , шириной  $a$ , высотой  $b$  стрела прогиба определяется по формуле

$$d = \frac{4PL^3}{Eab^3}. \quad (3.2)$$

Модуль упругости, или модуль Юнга, исходя из формулы (3.1) определяется следующим образом:

$$E = \frac{4PL^3}{dab^3}, \quad (3.3)$$

где  $P$  – нагрузка, приложенная к незакрепленному концу стержня;

$L$  – длина стержня, измеряемая между сечением А – А' и точкой касания ножки индикатора (рисунок 6);

$a$  – ширина стержня ( $50 \pm 0,5$  мм =  $0,05 \pm 0,0005$  м);

$b$  – высота стержня ( $10 \pm 0,5$  мм =  $0,01 \pm 0,0005$  м).

Из формулы 3.3 видно, что модуль упругости можно определить, если будут известны стрела прогиба, нагрузка, расстояние и геометрические размеры деформируемого стержня, т. е. можно вычислить величину  $E$ , если измерить стрелу прогиба.

Таким образом, модуль упругости характеризует упругие свойства деформируемого тела (приложение Г).

Физический смысл модуля упругости можно понять из соотноше-

ния, связывающего величину относительной деформации растяжения с напряжением упругой деформации и выражающегося формулой

$$\sigma = E \frac{\Delta x}{x}, \quad (3.4)$$

где  $\sigma$  – напряжение упругой деформации (измеряется в паскалях);

$\frac{\Delta x}{x}$  – абсолютная деформация;

$x$  – первоначальное значение деформируемого размера.

Таким образом, модуль упругости численно равен напряжению упругости деформации, которое возникает при относительной деформации, равной единице, т. е. когда  $\Delta x = x$ , тогда  $E = \sigma$ .

На рисунке 6 представлена установка для определения модуля упругости металлического стержня.

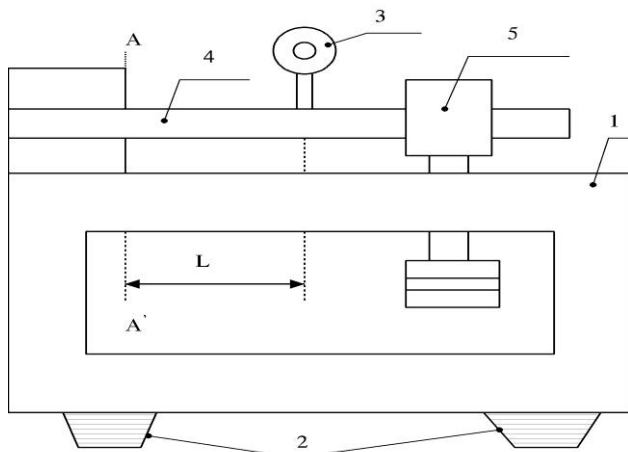


Рисунок 6 – Установка для определения модуля упругости

Установка представляет собой раму (1), расположенную на опорах (2). На раме установлен индикатор (3), который перемещается по ней и одновременно своей подвижной опорой касается поверхности стержня (4). Стрела прогиба фиксируется по положению стрелки относительно циферблата индикатора.

Исследуемый стержень закреплен с одного конца неподвижно. С другой стороны стержня установлена опорная призма с подвеской (5) для

гирь, которые находятся в ящике. Опорная призма может перемещаться вдоль стержня (4).

### ***Задание: Измерение модуля Юнга по изгибу стержня***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Установите индикатор так, чтобы его ножка касалась поверхности испытуемого стержня.

2. Поверните циферблат индикатора, установите его нулевое деление большой шкалы против нулевого указателя.

3. Измерьте длину стержня ( $L$ ) между сечением А – А' (сечение заделки стержня) и точкой касания ножки индикатора (3) с помощью масштабной линейки (см. рисунок 6).

4. На подвеску осторожно положите грузы известной массы ( $P$ ) и в процессе нагружения при каждой нагрузке наблюдайте показания индикатора ( $n_i$ ).

5. Подобные операции проделайте также в обратном направлении, т. е. при постепенном удалении грузов получите отсчет по индикатору ( $n'_i$ ), соответствующий той же величине груза  $P$ , находящегося на подвеске.

6. Найдите среднее значение показаний индикатора ( $N_i$ ) по формуле

$$N_i = \frac{n_i + n'_i}{2}. \quad (3.5)$$

7. Учитывая цену деления индикатора, определите стрелу прогиба стержня:

$$d_i = 0,01 N_i. \quad (3.6)$$

8. Сместите индикатор в другое положение по отношению к сечению заделки А – А' и повторите операции 3–6 раз.

9. По окончании измерений стержень освободите от грузов и подвески, грузы положите в ящик.

10. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 5.

Таблица 5 – Результаты измерений модуля упругости

Номер опыта	$P$ , Н	$L$ , мм	$n_i$	$n'_i$	$N_i$	$d$ , мм	$E$ , Па
-------------	---------	----------	-------	--------	-------	----------	----------

11. По формуле (3.3) рассчитайте значение  $E$ .

12. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения модуля упругости.

13. Сформулируйте вывод и запишите окончательный результат, используя следующую формулу:

$$E = \overline{E} \pm \overline{\Delta E}. \quad (3.7)$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют деформацией?
2. Какие деформации называются упругими, а какие пластичными?
3. В чем заключается физический смысл закона Гука?
4. В чем состоит физический смысл модуля Юнга?
5. Какова единица измерения и размерность модуля упругости?
6. Чему равна средняя относительная погрешность для модуля упругости?
7. Какова единица измерения механического напряжения?
8. Как и где используются свойства деформации, упругости и прочности для товаров?

## **Лабораторная работа 4**

### **Определение момента инерции махового колеса**

***Цель работы:*** уяснить физический смысл момента инерции вращающегося тела, рассчитать по данным, полученным экспериментально, момент инерции махового колеса; сравнить величину момента инерции махового колеса с величиной момента инерции, определяемой по геометрическим размерам и плотности материала этого же махового колеса (экспериментальным значением).

### ***Материальное обеспечение***

1. Прибор типа ФП-2.
2. Масштабная линейка.
3. Секундомер.

### ***Теоретические сведения***

*Момент инерции* является мерой инерционных свойств тела при вращательном движении этого тела. Он определяет кинетическую энергию вращающегося тела, поэтому значение величины момента инерции необходимо при решении многих инженерных задач. Для вра-



щающихся тел определение момента инерции усложняется наличием сил трения и сил сопротивления среды, учет этих сил необходим для точного расчета величины момента инерции.

Рассмотрим пример определения момента инерции маховика ( $I$ ), вращающегося под действием силы тяжести груза  $m$ . Установка (рисунок 7) представляет собой закрепленный на массивном настенном кронштейне маховик (1), состоящий из двух дисков (2), вращающихся на подшипниках скольжения (3). Ось вращения маховика (2) проходит через центр тяжести этого маховика.

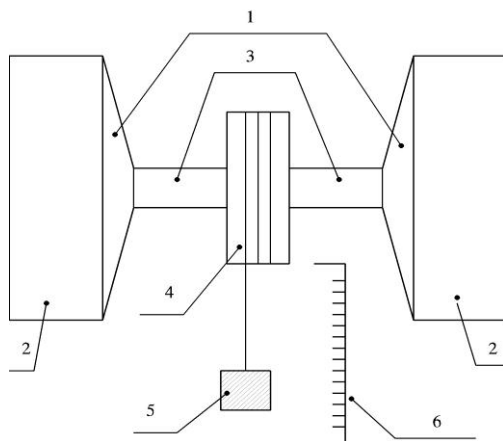


Рисунок 7 – Схема установки махового колеса

На оси маховика укреплен шкив (4) с радиусом ( $r$ ), равным 20 мм, для подсоединения шнура с грузом (5). При навивке шнура на шкив груз поднимается на высоту  $h_1$ , и вся система получает запас потенциальной энергии ( $W_n$ ), рассчитываемой по форме

$$W_n = mgh_1. \quad (4.1)$$

При освобождении маховика груз опускается, приводя маховик в равномерно ускоренное вращение, и вся система при опускании груза на величину  $h_1$  приобретает кинетическую энергию ( $W_k$ ), которая исчисляется по следующей формуле:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}, \quad (4.2)$$

где  $v$  – скорость;

$\omega$  – угловая скорость.

Отсчет величин  $h_1$  и  $h_2$  производится по линейке (6). Время опускания груза ( $t$ ) фиксируется секундомером.

Под действием силы тяжести маховик приходит в движение, приобретая энергию, рассчитываемую по формуле (4.2), за счет потенциальной энергии:

$$W_n = mgh \quad (4.3)$$

Следовательно, можно составить уравнение закона сохранения энергии махового колеса:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + fh_1, \quad (4.4)$$

где  $fh_1$  – работа по преодолению силы трения;

$f$  – сила трения в подшипниках махового колеса.

Оценку силы трения проводят с учетом того, что после опускания тела с массой  $m$  на полную длину подвеса  $h_1$ , маховик по инерции будет вращаться, и нить подвеса вновь начнет наматываться на цилиндр.

В результате этого явления груз массой  $m$  поднимется на высоту  $h_2 < h_1$ , сообщая маховику некоторый запас потенциальной энергии ( $mgh_2$ ) и произведя работу против сил трения, равную произведению  $\phi M$  (где  $\phi$  – полный угол поворота маховика,  $M$  – момент сил трения), т. е. выражение кинетической энергии можно записать следующим образом:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} = mgh_2 + \phi M = mgh_2 + \phi fr. \quad (4.5)$$

Подставив уравнение (4.5) в уравнение (4.4) и решив полученное равенство, получим формулу для определения силы трения:

$$f = mg \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \quad (4.6)$$

Учитывая соотношение (4.6), а также то, что при опускании груза имеет место равноускоренное движение, получим:  $v = at$ . При этом высота определяется по формуле

$$h_1 = \frac{at^2}{2} \quad (t - \text{время опускания груза}). \quad (4.7)$$

Тогда значения  $v$ ,  $w$  будут исчисляться следующим образом:

$$v = \frac{2h_1}{t}, \quad w = \frac{v}{r}, \quad (4.8)$$

где  $r$  – радиус вала.

С учетом формулы (4.4) угловая скорость будет равна:

$$w = \frac{2h_1}{rt}. \quad (4.9)$$

Подставляя выражения (4.6), (4.8), (4.9) в уравнение (4.4), получим для величины момента инерции следующее выражение:

$$I_3 = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h_1} \left( 1 - \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \right) - 1 \right). \quad (4.10)$$

Следовательно, величину  $I_3$  можно определить из выражения (4.10), зная величины радиуса шкива ( $r$ ), время опускания груза ( $t$ ), высоту опускания груза ( $h_1$ ), высоту подъема груза ( $h_2$ ). Все эти величины легко могут быть определены с помощью прибора ФП-2, линейки и секундомера. Момент инерции этого же махового колеса ( $I_6$ ) можно определить по геометрическим размерам (диаметру и толщине) и плотности материала махового колеса по формуле

$$I_6 = \frac{m_0 R^2}{2} \quad (m_0 = V\rho), \quad (4.11)$$

где  $m_0$  – масса махового колеса;

$V$  – объем махового колеса;

$R$  – радиус махового колеса;

$\rho$  – плотность материала махового колеса.

### ***Задание: Измерение момента инерции махового колеса***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с установкой махового колеса. Вращая шкив, поднимите груз на высоту  $h_1 = 20\text{--}40$  см.

2. Опустите диск и одновременно пустите секундомер.

3. В момент опускания груза на высоту  $h_1$  остановите секундомер, тем самым фиксируя время опускания груза.

4. Отметьте высоту второго поднятия груза  $h_2$  по масштабной линейке.

5. Повторите операции 3–5 раз, каждый раз меняя высоту  $h_1$ .
6. Результаты измерений оформите в виде в таблицы 6.

Таблица 6 – Определение момента инерции махового колеса

Номер опыта	$h_1$ , м	$t$ , с	$h_2$ , м	$f$ , Н	$I_3$ , кг·м <sup>2</sup>	$I_6$ , кг·м <sup>2</sup>
-------------	-----------	---------	-----------	---------	---------------------------	---------------------------

7. Полученные значения  $h_1$ ,  $h_2$  и  $t$  (8 кг) подставьте в уравнение (4.6) и определите величину силы трения.

8. Подставьте в уравнение (4.10) найденные величины  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $t$ ,  $m$  (8 кг) и  $r$  (20 мм) и вычислите момент инерции.

9. Определите момент инерции вращающегося маховика с диаметром 400 мм, толщиной 6,5 мм, плотностью материала  $7,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

10. Сформулируйте вывод по результатам работы. Сравните величины  $I_3$  и  $I_6$ . Определите абсолютную и относительную погрешности результата вычислений величины момента инерции. Окончательный результат представьте, используя следующую формулу:

$$I = I_3 \pm \overline{\Delta I_3}. \quad (4.12)$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называется моментом инерции? В каких единицах он измеряется?
2. Какой закон положен в основу расчетной формулы для момента инерции?
3. Что называется моментом силы? В каких единицах он измеряется?
4. О чем гласит второй закон динамики для вращательного движения?
5. В каких единицах измеряется момент импульса тела?

## **Лабораторная работа 5**

### **Определение ускорения силы тяжести при помощи оборотного маятника**

**Цель работы:** рассмотреть основные параметры колебательного движения, ознакомиться с простейшими колебательными системами (физическим, математическим и оборотным маятниками); установить

связи между основными параметрами колеблющейся системы с ускорением силы тяжести, определить ускорение силы тяжести с помощью оборотного маятника.

### *Материальное обеспечение*

1. Оборотный маятник типа ФП-1А.
2. Секундомер.
3. Линейка.

### *Теоретические сведения*

Пусть вектор  $A$  вращается против часовой стрелки вокруг точки  $O$  с постоянной скоростью (рисунок 8).

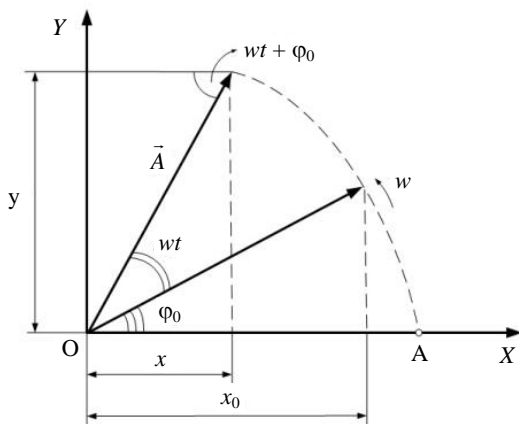
Тогда проекция конца вектора будет совершать относительно точки  $O$  колебательное движение. Величина смещения этой проекции ( $OO_1 = x$ ) будет изменяться в пределах от  $+A$  до  $-A$  и в любой момент времени следующим образом:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (5.1)$$

где  $\varphi_0$  – амплитуда углового смещения.

Соответственно, смещение проекции конца вектора  $A$  на ось  $y$  определяется по следующей формуле:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (5.2)$$



## Рисунок 8 – Вращение вектора $A$

Колебания, описываемые уравнениями (5.1) и (5.2), называются *гармоническими*.

Примерами систем, способных совершать гармонические колебания, являются пружинный, физический, математический и оборотный маятники.

Система, состоящая из спиральной пружины, закрепленной в верхней части, к нижнему концу которой подвешен груз, называется *пружинным маятником* (рисунок 9).

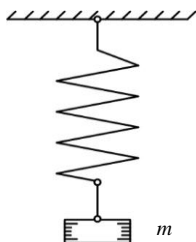
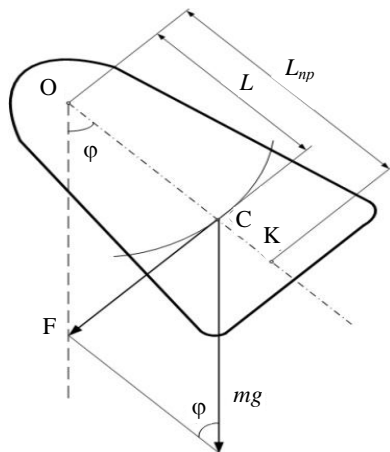


Рисунок 9 – Схема пружинного маятника

Если пружину упруго деформировать (сжать или растянуть) и затем предоставить ее самой себе, то совершаемые ею колебания будут гармоническими. Собственная частота и период этих колебаний определяются по формулам (5.6) и (5.7).

Твердое тело произвольной формы, имеющее возможность качаться под действием собственной силы тяжести ( $mg$ ) вокруг неподвижной горизонтальной оси  $O$ , проходящей через центр тяжести  $C$  этого тела – *ось качения*, будет называться *физическим маятником* (рисунок 10).



**Рисунок 10 – Схема распределения сил физического маятника**

Если такой маятник отклонить от положения равновесия и затем предоставить его самому себе, то он будет совершать свободные колебания. Возвращающей силой в этом случае будет составляющая силы тяжести, рассчитываемая по формуле

$$F = -mg \sin \varphi \quad (m - \text{масса маятника}). \quad (5.3)$$

Знак « $-$ » в выражении (5.3) поставлен в связи с тем, что сила и угловое смещение всегда направлены противоположно. При малых отклонениях ( $\varphi < 6^\circ$ )  $\sin \varphi \approx \varphi$ , и сила в этом случае будет исчисляться по формуле

$$F = -mg \varphi.$$

Таким образом, возвращающая сила, действующая в физическом маятнике, так же как и в пружинном, пропорциональна угловому смещению и противоположна по знаку.

Следовательно, при малых угловых смещениях физический маятник будет совершать гармонические колебания, представленные следующим уравнением:

$$\varphi = \varphi_0 \cos \omega t. \quad (5.4)$$

Для определения собственной частоты ( $\nu$ ) и периода колебаний ( $T$ ) физического маятника воспользуемся основным уравнением динамики для вращательного движения:

$$M = I \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (5.5)$$

где  $M$  – момент вращательной силы;

$I$  – момент инерции маятника;

$\frac{d^2 x}{dt^2}$  – угловое ускорение маятника.

Учитывая, что  $\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x$  и  $M = FL$  ( $L$  – длина маятника), после подстановки этих величин в уравнение (5.5), получим:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgL}{I}}; \quad (5.6)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgL}}. \quad (5.7)$$

При этом  $L = OC$  (см. рисунок 10).

Система где материальная точка массой  $m$ , подвешенная на невесомой нерастяжимой нити длиной  $L_0$ , совершает колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести, называется *математическим маятником* (рисунок 11).

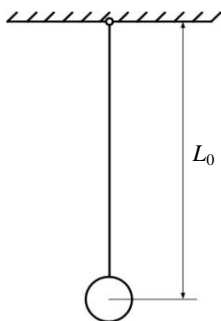


Рисунок 11 – Схема математического маятника

Математический маятник представляет собой предельный случай физического маятника, у которого вся масса сосредоточена в его центре инерции.

Учитывая, что момент инерции материальной точки с массой  $m$  равен:  $I = m L_0^2$  (где  $L_0$  – длина маятника), находим выражение собственной частоты и периода колебаний математического маятника по формулам

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L_0}}; \quad (5.8)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_0}{g}}, \text{ так как } \nu = \frac{1}{T}. \quad (5.9)$$

Сопоставляя формулы (5.6) и (5.7) с формулами (5.8) и (5.9), отме-



чаем, что математический маятник длиной, равной  $L_0 = L_{np} = \frac{I}{mL}$ , совершает колебания с частотой, равной частоте данного физического маятника. Приведенная длина всегда больше расстояния от оси вращения до центра тяжести физического маятника ( $L_{np} > L$ ).

По теореме Штейнера, если известен момент инерции тела относительно оси  $I_c$ , проходящей через его центр тяжести, то момент инерции относительно любой другой оси, параллельной первой и отстоящей от нее на расстоянии  $L$ , равен:

$$I = I_c + mL^2. \quad (5.10)$$

Таким образом, приведенная длина физического маятника определяется следующим соотношением:

$$L_{np} = \frac{I}{mL} = \frac{I_c + mL^2}{mL} = L + \frac{I_c}{mL} > L.$$

Точка К (см. рисунок 10), лежащая на продолжении прямой ОС на расстоянии  $L_{np}$  от оси вращения, называется *центром качания*. Можно показать, что точка подвеса физического маятника и его центр качания обратимы.

Это значит, что если повернуть маятник на  $180^\circ$  и его центр качания сделать точкой подвеса, то прежняя точка подвеса окажется новым центром качания. При этом в обоих случаях приведенная длина маятников одинакова, а поэтому равны и периоды колебаний. Это свойство присуще любому физическому маятнику, если центр качания лежит в пределах маятника. В этом случае маятник называется *оборотным*.

Период колебаний обратного маятника равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_{np.}}{g}}. \quad (5.11)$$

Из формул (5.6)–(5.9) видно, что оба вида маятника могут применяться для определения ускорения силы тяжести. Однако достаточно точное измерение величины  $g$  с помощью математического маятника невозможно, так как ни один из реальных маятников нельзя считать математическим.

Для определения ускорения силы тяжести при пользовании любым физическим маятником затруднение вызывает расчет его момента инерции. Указанных недостатков лишен обратный маятник, так как

его период колебаний (при данном  $g$ ) зависит только от приведенной длины маятника, которая может быть определена достаточно точно.

Таким образом, для измерения ускорения силы тяжести пользуются физическим маятником особой конструкции, которая называется обратным маятником. Данный маятник (рисунок 12) состоит из металлического стержня, снабженного двумя неподвижными упорами-призмами, на которые подвешивают обратный маятник. Кроме того, на стержне помещены две чечевицы (линзы), одна из них подвижная (D), а другая – неподвижная (C).

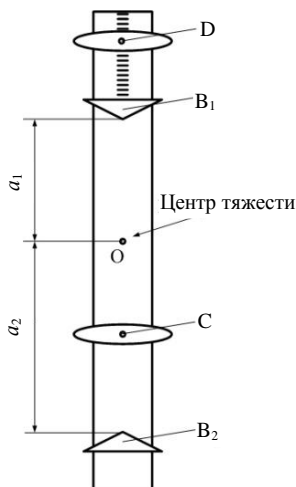


Рисунок 12 – Схема обратного физического маятника

Используя обратимость обратного маятника, в процессе измерения находят такое положение подвижной чечевицы, при котором обратный маятник, подвешенный на призмах, колеблется с приблизительно одинаковыми периодами ( $T_1$  и  $T_2$ ). Но получить даже приблизительно совпадение периодов колебаний около обеих осей обратного маятника очень трудно, поэтому ученым Бесселем был предложен метод и формула для определения значения ускорения силы тяжести, когда периоды колебаний маятника равны лишь приближенно.

Формула Бесселя имеет следующий вид:

$$g = \frac{8\pi^2 L_{np}}{T_1^2 + T_2^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{T_1^2 - T_2^2}{T_1^2 + T_2^2} \cdot \frac{L_{np}}{a_1 - a_2}}, \quad (5.12)$$

где  $L_{пр}$  – приведенная длина оборотного маятника (0,73 м) – расстояние между призмами маятника;

$T_1$  и  $T_2$  – периоды колебания при одном и другом положении маятника;

$a_1$  и  $a_2$  – расстояния от точек подвеса до центра тяжести при одном и другом положении маятника.

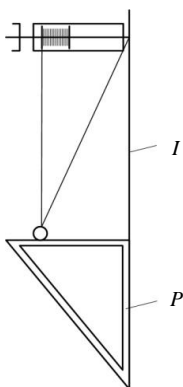
Эта формула позволяет относительно просто и с достаточной степенью точности найти величину ускорения силы тяжести при приближенном равенстве периодов колебаний и известных величинах  $L$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ .

Таким образом, данный маятник сочетает в себе два типа маятников (физический и оборотный) и называется *универсальным*. Расстояние  $L$  между призмами постоянно и равно 730 мм (0,73 м). Это расстояние равно приведенной длине оборотного маятника, если при его установке на ребрах первой и второй призм периоды колебаний  $T_1$  и  $T_2$  остаются приблизительно неизменными.

В комплект установки входит специальная подставка с призмой для нахождения центра тяжести оборотного маятника. Центр тяжести оборотного маятника смещен в сторону неподвижной чечевицы  $C$ , следовательно, величины  $a_1$  и  $a_2$  (см. рисунок 12) будут значительно отличаться одна от другой. Такое положение центра тяжести позволяет определить величину приведенной длины оборотного маятника с небольшой точностью (не менее чем в 1 мм).

В качестве примера установки универсального маятника можно привести маятник типа ФП-1А, представляющий собой настенный кронштейн, на котором смонтирована подушка опорных призм физического маятника и закреплены концы нити бифилярного подвеса математического маятника (рисунок 13).

Универсальный маятник выполнен в виде свинцового шарика, подвешенного бифилярно на капроновой нити, длина которого меняется с помощью барабанчика.



**Рисунок 13 – Маятник универсальный типа ФП-1А**

Физический маятник прибора представляет собой стальной стержень с закрепленными на нем двумя грузами (чечевицами) и двумя неподвижными призмами, на которых он подвешивается на кронштейне. При перемене призмы подвеса маятник превращается в обратный.

**Задание 1. Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника**

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с установкой математического маятника.
2. Опустив шарик, определите длину  $L_1$ . Отведите маятник на угол 6–10° и определите время 50 полных колебаний  $t_1$ . Измерения повторите 3 раза.

3. Вычислите период колебаний  $T_1 \left( \frac{t_1}{50} \right)$ .

4. Установите новую длину маятника так, чтобы разность  $L_1 - L_2$  равнялась 40–50 см. Определите время 50 полных колебаний  $t_2$ . Измерения повторите 3 раза. Рассчитайте период колебаний  $T_2 \left( \frac{t_2}{50} \right)$ .

5. Вычислите ускорение силы тяжести по формуле

$$g = 4\pi^2 \frac{L_1 - L_2}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (5.13)$$

6. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 7.

**Таблица 7 – Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника**

Номер опыта	$L_1$ , м	$t_1$ , с	$T_1$ , с	$L_2$ , м	$t_2$ , с	$T_2$ , с	$g$ , м/с <sup>2</sup>
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------------------

7. Вычислите абсолютную и относительную погрешности.

8. Окончательный результат расчета ускорения силы тяжести представьте, используя формулу

$$g = \bar{g} \pm \overline{\Delta g}. \quad (5.14)$$

## ***Задание 2. Определение ускорения силы тяжести с помощью обратного маятника***

Определение ускорения силы тяжести при помощи обратного маятника по формуле (5.12) сводится к определению такого положения подвешенного груза, при котором период колебаний при установке его на ребрах первой и второй призм становится приблизительно равным. В этом случае расстояние между ребрами призм равно приведенной длине обратного маятника ( $L = 0,73$  м).

Задание выполните в следующем порядке:

1. Укрепив внешнюю чечевицу D недалеко от конца обратного маятника, подвесьте маятник на упоре  $B_1$ , расположенном ближе к внешней чечевице (см. рисунок 12).

2. Передвигая внешнюю чечевицу через 5 мм в пределах 7–12 см основной шкалы, нанесенной на стержне маятника, найдите периоды колебаний маятника с помощью секундомера для каждого положения чечевицы D. В результате получится 7–9 значений периода  $T'$ . Каждое измерение периода  $T'$  включает 50 полных колебаний и проводится дважды. Колебания маятника должны происходить с угловой амплитудой не более  $5^\circ$ .

3. По средним арифметическим значениям периода, полученным из двух определений, постройте на графике зависимость величины периода  $T'$  от величины деления шкалы, на котором находится внешняя чечевица D.

4. Переворачивая маятник, заставьте колебаться его на второй призме B. Вновь в тех же пределах (7–12 см) основной шкалы и с тем же шагом (5 мм), но в обратном направлении шкалы измерьте периоды колебаний  $T''$ .

5. На ранее построенном графике зависимости  $T'$  от делений шкалы отложите зависимость  $T''$  от делений шкалы.

Точка пересечения двух полученных кривых определяет положение внешней чечевицы, которое дает наиболее близкие друг к другу значения  $T'$  и  $T''$ .

6. Поставьте внешнюю чечевицу в найденное положение шкалы и определите периоды колебаний  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1$  – при подвесе на призме  $B_1$ ,  $T_2$  – при подвесе на призме  $B_2$ ). При этом определение каждого периода производится трехкратным измерением времени 100 полных колебаний маятника.

7. Найдите расстояния  $a_1$  и  $a_2$  путем помещения маятника на подставку с острием в положение равновесия. При этом ребро подставки на шкале маятника будет положением центра тяжести, а расстояния

$a_1$  и  $a_2$  отсчитывают от найденного центра тяжести до опорных призм В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> с помощью масштабной линейки с точностью до 1 мм.

8. По полученным данным, пользуясь формулой (5.12), вычислите значение ускорения силы тяжести.

9. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 8.

Таблица 8 – **Определение ускорения силы тяжести с помощью оборотного маятника**

Положение внешней чечевицы, см	$T'$ , с	$T''$ , с	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$a_1$ , м	$a_2$ , м	$g_{об}$ , м/с <sup>2</sup>
-----------------------------------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------------------------

10. Вычислите абсолютную и относительную погрешности.

11. Окончательный результат определения ускорения силы тяжести ( $g_{об}$ ) представьте, используя формулу (5.14).

12. Сформулируйте выводы по выполненным измерениям и вычислениям. Сравните результаты измерений, полученные в двух заданиях.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какими параметрами определяется собственная частота колебаний системы?

2. Что представляет собой физический маятник?

3. Что называется приведенной длиной физического маятника?

4. Что называется моментом инерции? Каковы единицы его измерения?

5. Что представляет собой математический маятник?

6. Как формулируется теорема Штейнера?

7. Что представляет собой основное уравнение динамики для вращательного движения?

8. Что является центром качания физического маятника?

9. Каково определение понятия «ускорение силы тяжести»? В каких единицах оно измеряется?

10. Что называется частотой и периодом колебаний?

## **Лабораторная работа 6**

### **Определение длины волны и скорости распространения звуковых колебаний**

**Цель работы:** измерить длину звуковых волн в диапазоне 400–2 000 Гц, определить скорость звука в воздухе, рассчитать модуль Юнга для воздуха, отношение теплоемкостей и универсальную газовую постоянную.

## *Материальное обеспечение*

1. Прибор для измерения длины звуковых волн типа ФП-42А.
2. Осциллограф.
3. Звуковой генератор.

## *Теоретические сведения*

Скорость звука можно определить, если измерить длину звуковой волны, создаваемую источником звука с известной частотой. Измерение длины волны ( $\lambda$ ) удобно производить по отношению к стоячей волне ( $\lambda_{cm}$ ), длина которой находится в простом соотношении к длине бегущей волны:

$$\lambda = 2\lambda_{cm}. \quad (6.1)$$

Используя формулу зависимости скорости звуковой волны ( $v$ ) от длины бегущей волны ( $\lambda$ ) и частоты звуковой волны ( $\nu$ ) ( $v = \lambda\nu$ ), находим:

$$v = 2\lambda_{cm} \cdot \nu. \quad (6.2)$$

Скорость распространения звуковых волн в сплошной среде определяется с помощью физических параметров – модуля упругости воздушной среды ( $E$ ) и плотности среды ( $\rho$ ):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.3)$$

При этом плотность воздуха учитывается при нормальных условиях: 760 мм рт. ст.,  $T = 293$  К и относительной влажности 45% (приложение Д). Таким образом, по найденному значению  $v$  и  $\rho$  ( $1,29$  кг/м<sup>3</sup>) можно оценить модуль упругости воздуха. Используя формулу Лапласа, определяют значение величины  $E$ :

$$E = \frac{C_p}{C_v} \cdot P, \quad (6.4)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха при  $P = const$ ;

$C_v$  – удельная теплоемкость воздуха при  $v = const$ ;

$P$  – давление воздуха (определяют по барометру в миллиметрах ртутного столба и пересчитывают в единицы: Н/м<sup>2</sup> = Па).

Определив величину  $E$ , исчислим соотношение:

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma. \quad (6.5)$$

Зная величины  $E$  и  $\gamma$ , определим универсальную газовую постоянную ( $R$ ), используя следующее соотношение:

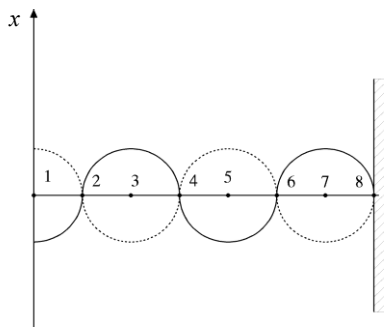
$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (6.6)$$

где  $\mu$  – молярная масса воздуха, равная 29 кг/кмоль.

Температуру определим по ртутному термометру в градусах Цельсия и переведем в кельвины. Следовательно, универсальная газовая постоянная равна:

$$R = \frac{v^2 \cdot \mu}{\gamma \cdot T}. \quad (6.7)$$

Простейшей звуковой волной является плоская монохроматическая (одной частоты) волна, которая распространяется в трубе, если в одном конце этой трубы находится источник возмущений – колеблющаяся мембрана динамика (рисунок 14).



*Условные обозначения:*

1, 3, 5, 7 – пучности; 2, 4, 6, 8 – узлы стоячей волны.

**Рисунок 14 – График стоячей волны**

Если смещение мембраны ( $B$ ) изменяется во времени по закону, выраженному уравнением  $B = A_0 \sin \omega t$ , то зависимость величины



смещения от времени в точке  $x$  среды исчисляется уравнением бегущей волны:

$$B = A_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A_0 \sin(\omega t - kx), \quad (6.8)$$

где  $\omega$  – угловая частота звуковых колебаний, равная  $\frac{2\pi}{T}$  ( $T$  – период колебаний);

$k$  – волновое число, равное выражению  $\frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{2\pi}{\lambda}$  ( $\lambda = v \cdot T$  – длина звуковых волн).

Если второй конец трубы закрыт твердой неподвижной стенкой, то звуковая волна будет отражаться от этой стенки. Вследствие этого явления движение воздуха в каждом сечении трубы можно рассматривать как результат сложения двух волн – падающей и отраженной.

Если при распространении и отражении звуковой волны не происходит ее затухания, то обе волны будут иметь одинаковые амплитуды:

$$B_+ = A_0 \sin(\omega t - kx) \text{ – падающая волна;}$$

$$B_- = A_0 \sin(\omega t - kx - \alpha) \text{ – отраженная волна.}$$

Здесь сдвиг фаз ( $\alpha$ ) обусловлен, с одной стороны, тем, что отраженная волна проходит путь от точки  $x$  до конца трубы и обратно, а с другой стороны, – тем, что изменение фазы может происходить при отражении от стенки. В случае отражения от жесткой (твердой) стенки волна смещений отражается с поворотом фазы  $B_-$  на угол  $\pi$ . Таким образом, для трубы с закрытым концом будут иметь место соотношения

$$B_+ = A_0 \sin(\omega t - kx);$$

$$B_- = -A_0 \sin(\omega t - k(2l - x)),$$

где  $l$  – длина закрытой трубы.

Знак «–» учитывает изменение фазы на угол  $\pi$  при отражении от жесткой стенки.

Результирующее смещение будет следующим:

$$B = B_+ + B_- = 2A_0 \sin k(l - x) \cdot \cos(\omega t - kl).$$

Здесь выражение  $2A_0 \sin k(l - x)$  – результирующая амплитуда, которая меняется от точки к точке по закону синуса: в точках, для кото-

рых  $\sin k(l - x) = 0$ , амплитуда равна нулю. Это, так называемые *узлы смещений*.

Расстояние между двумя соседними узлами соответствует изменению аргумента функции  $\sin \frac{2\pi}{\lambda}(l - x_1)$  от 0 до  $\pi$ , т. е. при  $\frac{2\pi}{\lambda}(l - x_1) = 0$ ,  $x_1 = l$  – это координата одного узла, а при  $\frac{2\pi}{\lambda}(l - x_2) = \pi$ ,  $x_2 = \left(l - \frac{\lambda}{2}\right)$  – это координата другого соседнего узла.

При этом разность координат будет следующей:  $x_1 - x_2 = \frac{\lambda}{2}$ .

Между двумя соседними узлами фаза смещений всех сечений одинакова, при переходе через узел фаза меняется на величину  $\pi$ .

Амплитуда смещений между двумя соседними узлами изменяется от 0 до максимума ( $2A_0$ ) и снова до 0.

Колебание с таким распределением амплитуд и фаз называется *стоячей волной*.

Длина стоячей волны – это расстояние между двумя соседними узлами, которое равно половине длины бегущей волны:

$$\lambda_{cm} = x_2 - x_1 = \frac{\lambda}{2}. \quad (6.9)$$

Экспериментальная установка генерации стоячей воды (рисунок 15) представляет собой горизонтальную металлическую трубу (1) на подставках, внутри которой перемещается поршень с капсюлем ДЭМШ-1А (2) при вращении рукоятки (3).

Перед открытым концом трубы располагается заглушка (4) с другим капсюлем МД-201. Заглушка может закрывать отверстие трубы.

Рисунок 15 – Установка генерации стоячей волны

К одному из телефонов (4), (2) подается переменное напряжение звуковой частоты от звукового генератора (5).

Звуковые колебания воздушной среды, преобразованные (микрофоном) в переменный электрический сигнал, подаются на вертикальный вход электронного осциллографа (6) типа ЭО.

На верхней стороне трубки расположена шкала с подвижным указателем (7) для определения длины стоячей волны.

**Задание: Определение длины волны и скорости распространения звуковых колебаний**

Задание выполните в следующем порядке:

1. Включите звуковой генератор и осциллограф и дайте им прогреться 5–10 мин.

2. Установите частоту генератора с помощью лимба в пределах 400–2 000 Гц.

3. Вращая рукоятку перемещения капсюля микрофона в трубе, найдите такое его положение, при котором амплитуда сигнала на экране осциллографа будет максимальной.

4. Сделайте отсчеты по шкале, соответствующие двум соседним максимумам  $x_1$  и  $x_2$ .

5. Определ

6. Исчисли

7. Рассчита

тайте частоту

8. По форм

9. По вычи

10. По най

11. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 9.

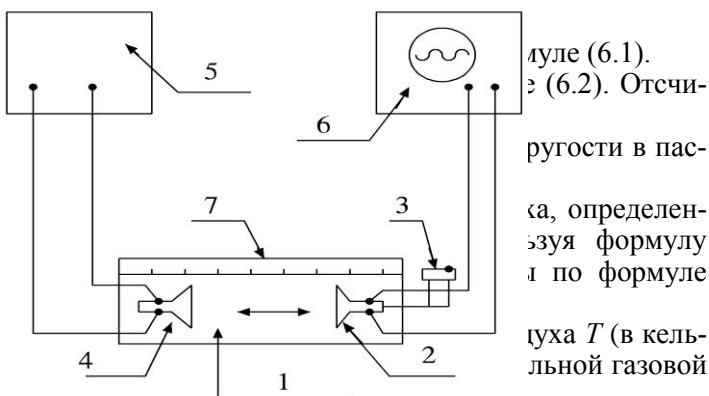


Таблица 9 – Результаты измерений и расчетов

$\nu$ , Гц	$x_1$ , м	$x_2$ , м	$\lambda_{\text{см.}}$ , м	$\lambda$ , м	$v$ , м/с	$E$ , Па	$P$ , Па	$\frac{C_p}{C_v}$	$R$ , Дж/моль·К
------------	-----------	-----------	----------------------------	---------------	-----------	----------	----------	-------------------	-----------------

12. Вычислите абсолютную и относительную погрешности для  $v$ .

13. Сформулируйте вывод и рассчитайте окончательный результат для показателя скорости.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Каковы основные характеристики волны? (Дайте их определения.)
2. Что называется звуком?
3. Что представляют собой звуковые колебания? (Охарактеризуйте их.)
4. Что называется интенсивностью звука и с какой характеристикой волнового процесса она связана?
5. С помощью каких физических параметров определяется скорость распространения звуковой волны?
6. Как записывается формула Лапласа?

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

### **Лабораторная работа 7**

#### **Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса**

**Цель работы:** изучить основные законы вязкости жидкости, экспериментально определить коэффициенты динамической и кинематической вязкости жидкостей.

### ***Материальное обеспечение***

1. Стекланные цилиндры на подставках.
2. Исследуемые вязкие жидкости.
3. Шарик.
4. Линейка.
5. Секундомер.

### ***Теоретические сведения***

Вязкость является важной физико-химической характеристикой

веществ. Величина, обратная вязкости, называется текучестью. *Вязкость*, или *внутреннее трение*, – свойство газообразных, жидких и твердых тел оказывать сопротивление их течению, т. е. перемещению различных слоев друг относительно друга. В результате такого перемещения возникает сила, направленная в сторону, противоположную скорости движения.

Возникновение этой силы можно объяснить экспериментально. Возьмем две расположенные друг над другом горизонтальные стеклянные обезжиренные пластинки со слоем жидкости или газа между ними (рисунок 16).

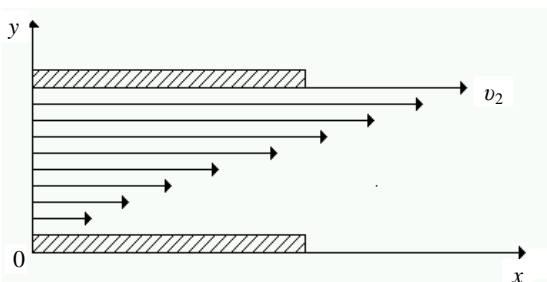


Рисунок 16 – Распределение скоростей в слое жидкости

Верхнюю пластинку приведем в движение со скоростью  $v_2$ . Слой жидкости, прилегающий непосредственно к верхней пластинке, благодаря силам молекулярного сцепления, прилипает к ней и движется тоже со скоростью  $v_2$ . Слой жидкости, прилипающий к нижней пластинке, остается вместе с ней в покое ( $v_1 = 0$ ). Всю толщину жидкости между пластинками можно рассматривать как систему слоев, скорости которых меняются от нуля до максимального значения.

Промежуточные слои движутся так, что каждый лежащий выше обладает большей скоростью, чем находящийся под ним. Каждый верхний слой обладает относительно нижнего скоростью, направленной в сторону движения пластинки, в то время как нижний слой относительно верхнего – скоростью противоположного направления.

Следовательно, со стороны нижнего слоя на верхний действует сила трения, замедляющая его движение, и, наоборот, со стороны верхнего на нижний – сила, ускоряющая его движение.

Силы, возникающие между слоями газа или жидкости, испытывающими относительное перемещение, называют силами *внутреннего трения*, а само явление возникновения таких сил – *вязкостью*.

*Динамическая вязкость* – это сила, которую необходимо приложить для взаимного перемещения двух слоев жидкости определенной

поверхности на определенное расстояние и с определенной скоростью (приложение Ж). Рассчитывается динамическая вязкость ( $\eta$ ) по формуле

$$\eta = \frac{F}{S \frac{dv}{dx}}, \quad (7.1)$$

где  $S$  – площадь поверхности;

$d$  – расстояние между поверхностями.

Физический смысл формулы (7.1) заключается в том, что при силе в 1 Н, площади поверхности 1 м<sup>2</sup>, расстоянии между этими поверхностями 1 м и скорости помещения этих слоев 1 м/с получаем единицу динамической вязкости. В международной системе измерений (СИ) динамическая вязкость измеряется в паскалях на секунду (Па·с).

*Кинематическая вязкость* – это отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности при одинаковой температуре. Единица измерения кинематической вязкости в СИ – метр квадратный в секунду (м<sup>2</sup>/с).

В настоящее время существует достаточно много методов определения вязкости. Мы воспользуемся одним из наиболее простых способов – методом Стокса. Он основан на измерении скорости шарика, падающего в исследуемой жидкости (рисунок 17).

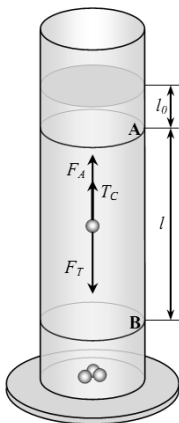


Рисунок 17 – Измерение скорости шарика по методу Стокса

При свободном падении шарика в вязкой покоящейся жидкости на

него действует несколько сил:

- *Сила тяжести* ( $F_T$ ), которая определяется по формуле

$$F_T = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ш} g. \quad (7.2)$$

где  $r$  – радиус шарика;

$\rho_{ш}$  – плотность шарика;

$g$  – ускорение свободного падения.

- *Выталкивающая сила* по закону Архимеда ( $F_A$ ), рассчитываемая по формуле

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ж} g, \quad (7.3)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность исследуемой жидкости.

- *Сила сопротивления движения* ( $T_C$ ), обусловленная силами внутреннего трения между слоями жидкости:

$$T_C = 6\pi\eta rv, \quad (7.4)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости (Па·с).

Как доказал Стокс, сила, действующая на шарик малого размера, прямо пропорциональна скорости его падения, радиусу шарика и зависит от динамического коэффициента вязкости.

Шарик изготовлен из материала, хорошо смачиваемого жидкостью, поэтому к его поверхности «прилипает» концентрический слой жидкости, неподвижный относительно шарика. Между этим слоем, движущимся со скоростью шарика, и остальной жидкостью возникает сила внутреннего трения, направленная против скорости шарика. Равнодействующая всех сил ( $R$ ), действующих на шарик, рассчитывается по следующей формуле:

$$R = F_T - (F_A + T_C). \quad (7.5)$$

Вначале скорость движения шарика будет возрастать. Но так как по мере увеличения скорости шарика сила сопротивления будет так же возрастать, то наступит такой момент, когда сила тяжести будет уравновешена с суммой сил ( $F_A + T_C$ ), а равнодействующая всех сил станет равной нулю:

$$F_T - (F_A + T_C) = 0. \quad (7.6)$$

С этого момента шарик будет двигаться равномерно с постоянной скоростью. Подставляя в формулу (7.6) соответствующие значения  $F_T$ ,  $F_A$ ,  $T_C$ , получим выражение для коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_{ш} - \rho_{ж}) \frac{r^2 g}{v}. \quad (7.7)$$

***Задание: Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса***

Задание выполните в следующем порядке:

1. На установке отметьте ниже уровня жидкости на 4–5 см точку А начала отсчета времени равномерного падения шарика (см. рисунок 17). Затем отмерьте расстояние  $\approx 20$ –30 см, отсчитав его линейкой вниз по движению шарика, и отметьте точку В, в которой будет заканчиваться измерение времени движения шарика.

2. Измерьте диаметр шарика микрометром 3 раза, вычислите среднее значение. Определите радиус шарика и запишите результат.

3. Пинцетом опустите шарик в сосуд с жидкостью (как можно ближе к оси цилиндра) и с помощью секундомера измерьте время его движения с установившейся скоростью на расстоянии между метками А и В. При наблюдении падения шариков осветите приборы со стороны наблюдателя. Измеренное время запишите.

4. Вычислите скорость падения шариков по формуле

$$v = \frac{S}{t}. \quad (7.8)$$

5. Вычислите динамическую вязкость, преобразовав формулу (7.7) следующим образом:

$$\eta = A \frac{r^2}{v} \left( A = \frac{2}{9}(\rho_{ш} - \rho_{ж})g \right). \quad (7.9)$$

Известно, что плотность шарика  $\rho_{ш} = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, плотность глицерина  $\rho_г = 1,27 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, плотность машинного масла  $\rho_м = 0,92 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

6. Определите величину кинематической вязкости ( $K$ ) по формуле

$$K = \frac{\eta}{\rho_{ж}}. \quad (7.10)$$



7. Определите среднее значение динамической вязкости жидкости, рассчитайте абсолютную и относительную ошибки измерений.
8. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 10.

Таблица 10 – **Определение динамической и кинематической вязкости жидкостей**

Исследуемая жидкость	Номер измерения	$r$ , м	$t$ , с	$v$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$\Delta\eta$ , Па·с	$K$ , м <sup>2</sup> /с
----------------------	-----------------	---------	---------	-----------	---------------	---------------------	-------------------------

9. Сделайте вывод о физическом смысле динамической и кинематической вязкости. Сравните полученные результаты с табличными данными. Результаты измерений запишите, используя формулу

$$\eta = \bar{\eta} \pm \overline{\Delta\eta} (\epsilon = x\%). \quad (7.11)$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют вязкостью жидкости?
2. Как формулируется закон Пуазейля и какова его математическая запись?
3. О чем гласит закон Архимеда? Каково его математическое выражение?
4. Как формируется закон Стокса и какова его математическая запись?
5. Что называется динамической вязкостью? В каких единицах она измеряется?
6. Что называется кинематической вязкостью? Каковы единицы ее измерения?
7. Где применяется метод Стокса?

## **Лабораторная работа 8**

### **Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости**

**Цель работы:** определить коэффициент поверхностного натяжения воды при комнатной температуре.

### ***Материальное обеспечение***

1. Сосуд с водой.
2. Мерный стакан.

### *Теоретические сведения*

На поверхности жидкости, вблизи границы, разделяющей жидкость и ее пар, молекулы испытывают межмолекулярное взаимодействие, отличающееся от межмолекулярного взаимодействия молекул, которое они испытывают, находясь внутри объема жидкости.

На рисунке 18 молекула *a*, находясь внутри объема жидкости, со всех сторон окружена другими молекулами той же жидкости, воздействующими на нее в среднем с одинаковыми силами, равнодействующая которых оказывается равной нулю. Молекула *b*, находящаяся в поверхностном слое жидкости, такими же молекулами окружена только со стороны нижней полусферы (концентрация молекул пара этой жидкости или газа, с которым граничит жидкость, во много раз меньше концентрации молекул жидкости, поэтому силами взаимодействия с молекулами пара или газа со стороны верхней полусферы можно пренебречь). В результате на молекулы, находящиеся в поверхностном слое, действует направленная внутрь жидкости равнодействующая сила ( $F_R \neq 0$ ).

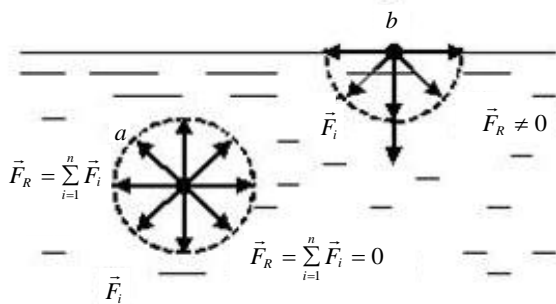


Рисунок 18 – Силы, действующие на молекулы в жидкости

Для перенесения молекул из глубины объема жидкости в поверхностный слой необходимо совершить работу по преодолению силы ( $\vec{F}_R$ ). Эта работа идет на увеличение поверхностной энергии и называется потенциальной энергией молекул поверхностного слоя.

*Коэффициентом поверхностного натяжения жидкости ( $\sigma$ ) назы-*

вается физическая величина, численно равная работе, необходимой для изотермического увеличения поверхности жидкости на единицу площади:

$$\sigma = \frac{dA}{dS}. \quad (8.1)$$

Коэффициент поверхностного натяжения измеряется в джоулях на метр квадратный ( $\text{Дж/м}^2 = \text{Н} \cdot \text{м/м}^2 = \text{Н/м}$ ).

На границе соприкосновения жидкостей с твердыми телами наблюдаются явления *смачивания* (несмачивания), при которых происходит искривление свободной поверхности жидкости около стенки твердого тела.

Поверхность жидкости, искривленная на границе ее соприкосновения с твердым телом, называется мениском. Линия, по которой мениск соприкасается с твердым телом, является периметром смачивания. Явления смачивания (несмачивания) характеризуются краевым углом ( $q$ ) между поверхностью твердого тела и мениском в точках их пересечения (рисунок 19).

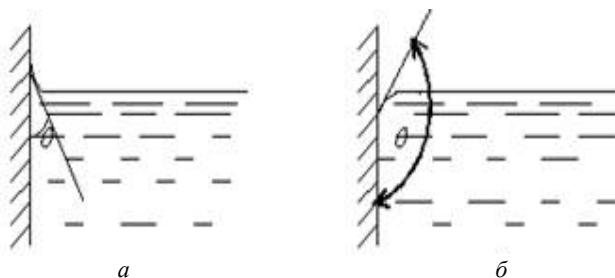


Рисунок 19 – Граница соприкосновения жидкостей с твердыми телами

Жидкость является смачивающей, если краевой угол острый ( $0 < q < p/2$ ) (рисунок 19а), а его косинус положителен ( $\cos q > 0$ ). Например, вода смачивает стекло, а ртуть смачивает цинк. Для жидкостей, не смачивающих твердое тело, краевой угол будет тупым ( $p/2 < q < p$ ), а его косинус отрицателен ( $\cos q < 0$ ) (рисунок 19б). Например, вода не смачивает парафин, а ртуть не смачивает чугун. Различие краевых углов при явлениях смачивания и несмачивания объясняется соотношением сил взаимодействия между молекулами твердых тел и жидкостей, с одной стороны, и сил межмолекулярного взаимодействия в жидкостях, с другой стороны. Если взаимодействие между

молекулами жидкости и твердого тела больше сил межмолекулярного взаимодействия в жидкости, то жидкость будет смачивающей; если же силы межмолекулярного взаимодействия в жидкости превышают силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, то жидкость является несмачивающей.

Если поверхность жидкости ограничена каким-то контуром (рисунок 20), то коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе, действующей на единицу длины контура, ограничивающего поверхность, и рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad (8.2)$$

где  $l$  – длина участка контура, на который действует сила.

Вектор силы поверхностного натяжения  $\vec{F}$  направлен по касательной к поверхности, охватываемой контуром, и перпендикулярен ему.

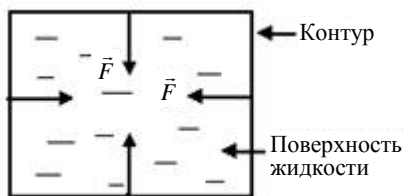
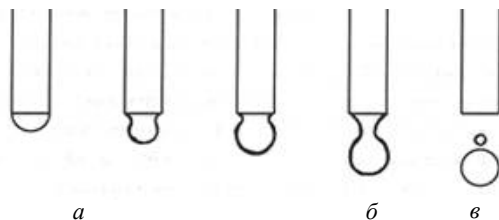


Рисунок 20 – Силы, действующие на поверхность жидкости

Наблюдая за отрывом капли жидкости от вертикальной узкой трубки, можно определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

На рисунке 21 видно, что размер капли постепенно нарастает, но отрывается она только тогда, когда достигает определенного размера (рисунок 21а).

Пока капля невелика, силы поверхностного натяжения достаточны, чтобы противостоять силе тяжести и предотвратить отрыв. Перед отрывом образуется сужение – шейка капли (рисунок 21б).



### Рисунок 21 – Отрыв капли жидкости от вертикальной узкой трубки

Пока капля удерживается на конце капиллярной трубки, на нее будут действовать следующие силы:

- Сила тяжести ( $m\vec{g}$ ), направленная вертикально вниз и стремящаяся оторвать каплю (рисунок 22).

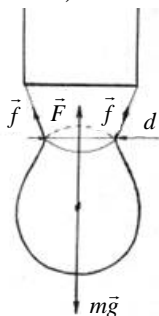


Рисунок 22 – Силы, действующие на каплю на конце капиллярной трубки

- Силы поверхностного натяжения ( $\vec{f}$ ), направленные по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно контуру ( $l$ ) шейки капли.

Эти силы стремятся удержать каплю.

Результирующая сила поверхностного натяжения ( $\vec{F}$ ) направлена вверх и равна:

$$\vec{F} = \sigma l. \quad (8.3)$$

Когда сила тяжести станет равна силе поверхностного натяжения произойдет отрыв капли (рисунок 21б):

$$m\vec{g} = -\vec{F}. \quad (8.4)$$

Для модулей сил эта формула имеет вид

$$mg = F. \quad (8.5)$$

С учетом формулы (8.2) запишем выражение

$$mg = \sigma l.$$

Так как длина контура шейки капли равна произведению  $\pi d$  ( $d$  – диаметр шейки капли), то  $mg = \sigma \pi d$ .

Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения равен:

$$\sigma = \frac{mg}{\pi d}. \quad (8.6)$$

Масса одной капли жидкости ( $m_k$ ) рассчитывается по формуле

$$m_k = \rho V_k,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (для воды  $\rho = 1\,000\text{ кг/м}^3$ );

$V_k$  – объем одной капли.

Если посчитать, сколько капель вытечет из капиллярной трубки в мерный стакан, и измерить их объем, то можно найти объем одной капли:

$$V_k = \frac{V}{N}, \quad (8.7)$$

где  $N$  – число капель.

Тогда коэффициент поверхностного натяжения можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma = \frac{\rho V g}{\pi d N}. \quad (8.8)$$

Формула (8.8) является рабочей расчетной формулой.

Описанный способ экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости дает хорошие результаты, несмотря на то, что в действительности отрыв капли происходит не совсем так, как описано выше.

В действительности капля не отрывается по линии окружности шейки. В момент, когда размер капли достигает значения, определяемого равенством (8.5), шейка начинает быстро сужаться (см. рисунок 21б), причем ей сопутствует еще одна маленькая капля (см. рисунок 21в).

Кроме того, в расчетах диаметр шейки капли в момент отрыва можно принять равным внутреннему диаметру трубки, так как трубка достаточно узкая и ее диаметр сравним с диаметром шейки капли.

Для расчета значения  $\sigma$  по формуле (8.8) необходимо во время измерения следить за чистотой капилляра и воды. Кроме того, коэффициент поверхностного натяжения зависит от температуры исследуемой жидкости: с ростом температуры он уменьшается. При комнатной температуре (20°C) табличное значение коэффициента  $\sigma$  для дистиллированной воды равен  $72,5 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

Для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости используется установка (рисунок 23), состоящая из сосуда с водой (1), укрепленного на штативе (5).

К сосуду прикреплена капиллярная трубка (3) с клапаном (2). Клапан позволяет регулировать поток воды, вытекающей из сосуда (1) в мерный стакан (4). При открытом клапане (2) вода капает из трубки (3) в мерный стакан. Если посчитать число капель и измерить их объем в мерном стакане, зная диаметр капилляра, можно найти коэффициент поверхностного натяжения воды.

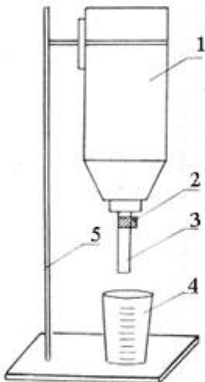


Рисунок 23 – Схема рабочей установки для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости

***Задание: Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Налейте воду в сосуд рабочей установки. Откройте клапан так, чтобы вода из капиллярной трубки вытекала по одной капле.

2. Посчитайте, сколько капель вытечет из трубки, чтобы мерный стакан был заполнен до объема  $\approx 5,20$  мл (по указанию преподавателя) ( $1 \text{ мл} = 10^{-6} \text{ м}^3$ ). Запишите количество капель и показатель объема

жидкости в мерном стакане. Опыт повторите 3–4 раза.

3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения по формуле (8.8). Измерьте значение диаметра капилляра.

4. Измерьте температуру окружающей среды.

5. Сравните рассчитанное значение коэффициента поверхностного натяжения с табличным (приложение И). Рассчитайте абсолютную ( $\Delta\sigma$ ) и относительную ( $\varepsilon$ ) погрешности искомой величины по формуле

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta\sigma}}{\overline{\sigma}} \cdot 100\%. \quad (8.9)$$

6. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 11.

Таблица 11 – Результаты расчетов

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	$V, \text{м}^3$	$N$	$d, \text{м}$	$\sigma, \text{Н/м}$	$\overline{\sigma}, \text{Н/м}$	$\overline{\Delta\sigma}, \text{Н/м}$	$\varepsilon, \%$
-------------	---------------------	-----------------	-----	---------------	----------------------	---------------------------------	---------------------------------------	-------------------

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что представляет собой явление поверхностного натяжения жидкостей?

2. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения?

3. По какой формуле рассчитывается коэффициент поверхностного натяжения и что обозначают входящие в нее величины?

4. Как можно получить рабочую формулу для определения значения  $\sigma$ ?

5. Что представляет собой рабочая установка для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей? Каков принцип ее работы?

6. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкостей?

## **Лабораторная работа 9**

### **Определение влажности воздуха**

**Цель работы:** научиться определять влажность по точке росы при помощи гигрометра Ламбрехта, измерять влажность воздуха при помощи психрометра Августа и рассчитывать основные физические параметры микроклимата воздушной среды помещения учебной лаборатории.

### ***Материальное обеспечение***



1. Психрометр Августа.
2. Гигрометр.
3. Барометр.
4. Таблицы.

### *Теоретические сведения*

Для количественной характеристики влажности воздуха пользуются понятиями абсолютной влажности, относительной влажности и дефицита влажности.

Под *абсолютной влажностью* воздуха понимается физическая величина, численно равная массе водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха при данной температуре.

Обычно абсолютную влажность выражают в граммах на метр кубический. Но так как плотность пара и его давление пропорциональны, то абсолютную влажность часто называют *упругостью* (*парциальным давлением*) водяного пара и выражают в миллиметрах ртутного столба или паскалях. При этом используется следующая формула:

$$P = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (9.1)$$

где  $P$  – давление пара (воды);

$\rho$  – плотность пара;

$\mu$  – молярная масса пара (воды);

$T$  – абсолютная температура (K);

$R$  – универсальная газовая постоянная (Дж/моль · K).

Для каждой температуры существует определенное *максимальное значение абсолютной влажности*, равное упругости насыщенного водяного пара при заданной температуре. Следует заметить, что при определенных условиях возможно перенасыщение пара. Однако состояние перенасыщенного пара является малоустойчивым и практически все излишки пара конденсируются.

Ощущение сухости или сырости воздуха связано не с абсолютной, а относительной влажностью.

Под *относительной влажностью* понимают отношение абсолютной влажности к ее максимальному значению при данной температуре. Относительная влажность чаще всего выражается в процентах.

Если обозначить относительную влажность через  $r$ , абсолютную влажность обозначить  $e$ , а максимальную влажность при той же тем-

пературе –  $E$ , то получим формулу

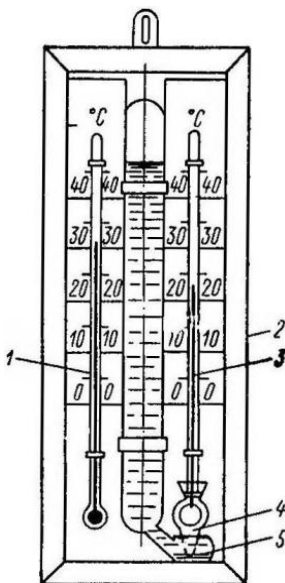
$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\% . \quad (9.2)$$

Разность между упругостью насыщенного пара ( $E$ ) и упругостью водяного пара ( $e$ ), фактически имеющегося в воздухе при той же температуре, называется *дефицитом влажности* ( $D$ ):

$$D = E - e. \quad (9.3)$$

Влажность воздуха измеряется гигрометрами и психрометрами. Абсолютную влажность воздуха можно определить с помощью психрометра Августа.

Психрометр Августа (рисунок 24) состоит из двух термометров: сухого и влажного. Шарик влажного термометра окутан кусочком марли или батиста.



Условные обозначения:

- 1 – сухой термометр; 2 – деревянная панель;
- 3 – влажный (мокрый) термометр;
- 4 – чехол (ткань); 5 – сосуд с водой.

Рисунок 24 – Психрометр Августа

Сухой термометр психрометра показывает температуру воздуха  $t_1^0$ , а влажный (в случае, если водяной пар в воздухе не является насыщенным) – температуру  $t_2^0$ , более низкую, зависящую от влажности окружающего воздуха. Разность температур  $(t_1^0 - t_2^0)$  тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха. При испарении воды с поверхности батиста температура влажного термометра понижается до тех пор, пока количество теплоты  $Q_1$ , поступающее к термометру из окружающей среды за время  $\tau$ , не станет равным количеству теплоты  $Q_2$ , необходимому для испарения.

В случае теплового равновесия ( $Q_1 = Q_2$ ) температура влажного термометра ( $t_2^0$ ) не меняется, несмотря на продолжающееся испарение.

Количество теплоты, поступающее из окружающей среды при небольших разностях температур и невысоких температурах, определяется исходя из закона Ньютона по формуле

$$Q_1 = \alpha \cdot S \cdot \tau \cdot (t_1^0 - t_2^0), \quad (9.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;

$S$  – величина поверхности шарика термометра, обернутого батистом.

Если за время  $\tau$  с поверхности  $S$  испаряется масса воды, то количество теплоты  $Q_2$ , необходимое для ее испарения, равно:

$$Q_2 = m \cdot \lambda, \quad (9.5)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота испарения при температуре влажного термометра (Дж/кг).

Если обозначить через  $m_1$  массу воды, испарившейся с поверхности за единицу времени, то  $m = m_1 \cdot \tau$ . Тогда количество теплоты, необходимое для испарения воды, будет исчисляться по формуле

$$Q_2 = m_1 \cdot \tau \lambda. \quad (9.6)$$

Согласно закону Дальтона масса воды рассчитывается следующим образом:

$$m_1 = k \cdot \frac{S(E - e)}{H}, \quad (9.7)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий главным обра-

зом от скорости протекания воздуха над испаряющейся поверхностью;

$E$  – упругость насыщенного водяного пара при температуре испаряющей поверхности, т. е. при температуре влажного термометра;

$H$  – атмосферное давление, пересчитанное в эквивалентное значение давления водяных паров.

В результате получим следующую формулу:

$$Q_2 = k \cdot \frac{S \cdot (E - e)}{H} \cdot \tau \cdot \lambda. \quad (9.8)$$

При установившемся режиме испарения  $Q_1 = Q_2$  используют формулу

$$t_1^0 - t_2^0 = \frac{k \cdot \lambda}{\alpha} \cdot \frac{(E - e)}{H}. \quad (9.9)$$

Из формулы (9.9) следует, что разность температур сухого и влажного термометров пропорциональна разности упругостей насыщенного водяного пара при температуре влажного термометра и водяного пара, находящегося в воздухе. Отсюда для абсолютной влажности можно определить следующее выражение:

$$e = E - \frac{\alpha \cdot H}{k \cdot \lambda} \cdot (t_1^0 - t_2^0). \quad (9.10)$$

Обозначив выражение  $\frac{\alpha}{k \cdot \lambda} = A$ , получим так называемую психрометрическую формулу

$$e = E - A \cdot H \cdot (t_1^0 - t_2^0), \quad (9.11)$$

где  $A$  – постоянная психрометра, зависящая от его конструкции и еще в большей степени от скорости обтекания воздухом влажного термометра (она может быть определена экспериментальным путем).

На основании психрометрической формулы составляют психрометрические таблицы для вычисления абсолютной и относительной влажности воздуха по показаниям сухого и влажного термометров. При составлении таблиц принимаются постоянными значения  $H$  и  $A$ . Следует иметь в виду, что составленные таким образом таблицы пригодны только для определенной конструкции психрометра.

В данной лабораторной работе показания психрометра используются как для определения абсолютной и относительной влажности, так и определения постоянной психрометра Августа. Из формулы (9.11) получаем следующую формулу:

$$A = \frac{E - e}{H(t_1^0 - t_2^0)}. \quad (9.12)$$

Упругость насыщенного водяного пара при температуре влажного термометра находится из таблицы зависимости давления насыщенного пара от температуры. Абсолютная влажность определяется с помощью гигрометра, атмосферное давление – по барометру, разность температур – по показаниям сухого и влажного термометров психрометра (при отсчете температур пользуются лупой).

***Задание: Определение влажности воздуха с помощью психрометра Августа***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Осторожно, чтобы вода не попала на сухой термометр, смочите дистиллированной водой батист, которым следует обернуть один из термометров психрометра Августа.

2. Через 15 мин после смачивания отсчитайте 3 раза разность температур  $(t_1^0 - t_2^0)$  сухого и влажного термометров психрометра и по психрометрической таблице (дана на психрометре) определите относительную влажность по психрометру.

3. Определите атмосферное давление по барометру и рассчитайте постоянную психрометра.

4. Полученные результаты измерений оформите в виде таблицы 12.

Таблица 12 – Определение постоянной психрометра

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$r, \%$	$H, \text{мм рт. ст.}$	$E, \text{мм рт. ст.}$	$e, \text{мм рт. ст.}$	$A, (^\circ\text{C})^{-1}$
-----------------------	-----------------------	---------	------------------------	------------------------	------------------------	----------------------------

5. Рассчитайте относительную и абсолютную ошибки вычислений постоянной психрометра.

6. Сформулируйте выводы по полученным результатам.

***Вопросы для самоконтроля***

1. Каков физический смысл закона Дальтона?

2. Какую размерность имеет постоянная психрометра Августа?
3. Как пользоваться психрометрическими таблицами?
4. Какое будет значение плотности пара, если известна величина упругости насыщенного водяного пара при температуре  $14^{\circ}\text{C}$ , взятая из таблицы?
5. Какова будет относительная влажность воздуха, если оба термометра в психрометре показывают одинаковую температуру?
6. Как изменится разность показаний сухого и влажного термометров в психрометре при понижении температуры воздуха, если абсолютная влажность остается неизменной?
7. Каков физический смысл коэффициента пропорциональности в законе Ньютона?

### **Лабораторная работа 10**

#### **Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха**

**Цель работы:** экспериментально определить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха в лаборатории, вычислить эффективный диаметр молекул воздуха.

#### ***Материальное обеспечение***

1. Стекланный баллон с краном.
2. Мерный стакан.
3. Капиллярная трубка.
4. Линейка.
5. Секундомер.
6. Термометр и барометр.

#### ***Теоретические сведения***

Молекулы газа, находясь в состоянии теплового хаотического движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Термин «столкновение» применительно к молекулам понимать буквально не следует (представлять себе этот процесс подобным соударению твердых шаров). Под *столкновением молекул* подразумевают процесс взаимодействия между молекулами, в результате которого молекулы меняют направление своего движения.

На рисунке 25 представлен график зависимости потенциальной энергии ( $e_n$ ) взаимодействия двух молекул от расстояния ( $r$ ) между их центрами.

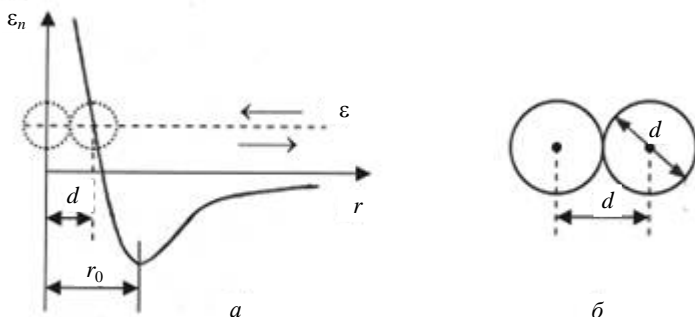


Рисунок 25 – График зависимости потенциальной энергии взаимодействия двух молекул от расстояния между их центрами

Рассмотрим с помощью этого графика процесс сближения (соударения) молекул (рисунок 25а). Мысленно поместим центр одной из молекул в начало координат, а центр второй молекулы представим перемещающимся по оси  $r$ . Пусть вторая молекула летит по направлению к первой из бесконечности, имея начальный запас кинетической энергии. Приближаясь к первой молекуле, она под действием силы притяжения движется со все возрастающей скоростью. В результате кинетическая энергия молекулы ( $e_k$ ) также растет. Однако полная энергия системы, равная  $e_k + e_n$ , остается неизменной (система двух молекул замкнута), так как одновременно уменьшается потенциальная энергия.

При прохождении молекулой точки с координатой  $r_0$  силы притяжения сменяются силами отталкивания, вследствие чего молекула начинает быстро терять скорость (в области отталкивания кривая  $e_n(r)$  идет очень круто). В момент, когда потенциальная энергия становится равной полной энергии системы, скорость молекулы обращается в нуль. В этот момент имеет место наибольшее сближение молекул друг с другом. После остановки молекулы все явления протекают в обратной последовательности. Сначала молекула движется со все возрастающей скоростью под действием силы отталкивания. Минував расстояние  $r_0$ , молекула попадает под действие замедляющей ее движение силы притяжения и, наконец, удаляется, имея первоначальный запас кинетической энергии.

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется *эффективным диаметром молекулы* ( $d$ ) (рисунок 25б).

Величина  $\sigma$ , рассчитываемая по формуле

$$\sigma = \pi d^2, \quad (10.1)$$

называется *эффективным сечением молекулы*.

Для того чтобы подсчитать среднее число столкновений ( $Z$ ), предположим, что все молекулы газа представляют собой упругие шарики радиуса  $r$  и все молекулы, кроме рассматриваемой, застыли неподвижно на своих местах.

Пусть молекула А движется со средней скоростью (рисунок 26). За единицу времени она столкнется со всеми другими молекулами, центры которых окажутся внутри цилиндра диаметром  $D$  и высотой  $L$ , численно равной средней скорости ( $\langle \bar{v} \rangle$ ). Молекула А не столкнется с молекулой С, но испытает соударение с молекулой В.

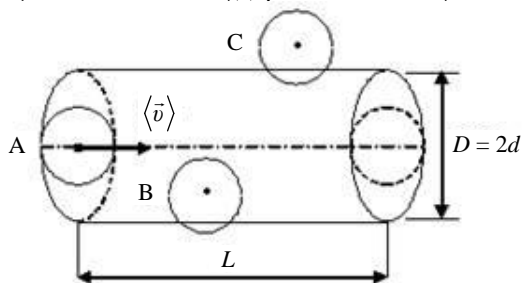


Рисунок 26 – Движение молекул в газе

Так как средняя длина свободного пробега молекул газа много больше, чем эффективный диаметр молекул, то объем цилиндра можно считать равным

$$V = \pi d^2 \langle v \rangle. \quad (10.2)$$

Умножив этот объем на число молекул в единице объема ( $n$ ), получим среднее число столкновений движущейся молекулы за единицу времени с неподвижными молекулами:

$$Z = \pi d^2 \langle v \rangle n. \quad (10.3)$$

В действительности все молекулы движутся, вследствие чего число соударений определяется средней скоростью движения молекул по отношению друг к другу, а не средней скоростью молекул относительно стенок сосуда:



$$\langle v_{\text{отн}} \rangle = \sqrt{2} \langle v \rangle. \quad (10.4)$$

Поэтому среднее число соударений должно быть увеличено в  $\sqrt{2}$  раз:

$$Z = \sqrt{2} \pi d^2 \langle v \rangle n. \quad (10.5)$$

Из соотношений (10.4) и (10.5) получим формулу для средней длины свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$ :

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (10.6)$$

Из уравнения состояния идеального газа  $\left( P = \frac{N}{V} kT = nkT \right)$  следует, что концентрация молекул газа ( $n$ ) равна:

$$n = \frac{P}{kT}. \quad (10.7)$$

Тогда формулу (10.6) можно записать в следующем виде:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}, \quad (10.8)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – термодинамическая температура;

$P$  – давление;

$d$  – эффективный диаметр молекул газа.

Из формулы (10.8) видно, что при постоянной температуре с увеличением давления средняя длина свободного пробега молекул газа уменьшается.

Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, связывающие макроскопические параметры газа (давление, объем, температура) с его микроскопическими параметрами (размеры, масса, скорость, средняя длина свободного пробега молекулы). Пользуясь этими формулами, можно на основании измеренных макроскопических параметров газа найти его микроскопические параметры.

Для нахождения средней длины свободного пробега молекул газа используют формулу, выражающую зависимость коэффициента внутреннего трения, или вязкости, ( $\eta$ ) от  $\langle \lambda \rangle$ :

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (10.9)$$

где  $\rho$  – плотность газа.

Из теории Максвелла следует, что средняя арифметическая скорость молекул газа равна:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (10.10)$$

где  $R$  – молярная газовая постоянная;

$\mu$  – масса одного моля.

Состояние идеального газа описывается уравнением Клапейрона – Менделеева:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (10.11)$$

Из уравнения (10.11) плотность газа вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}. \quad (10.12)$$

Подставив в формулу (10.9) значения  $\langle v \rangle$  и  $\rho$  из формул (10.10) и (10.12), получим выражение

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{\mu P}{RT} \langle \lambda \rangle \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (10.13)$$

В данной лабораторной работе используется зависимость коэффициента вязкости от радиуса капиллярной трубки, через которую проходит газ, ее длины и разности давлений ( $\Delta P$ ), возникающих на концах этой трубки. Эта зависимость выражается формулой Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Vl} \Delta P \tau, \quad (10.14)$$

где  $V$  – объем газа, в данном случае воздуха, проходящего через трубку за время  $\tau$ .

Из формул (10.13) и (10.14) следует, что средняя длина свободного пробега молекул воздуха равна:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\pi r^4}{16lP} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}} \frac{\Delta P \tau}{V}. \quad (10.15)$$

Исходя из формулы (10.6) эффективный диаметр молекулы можно рассчитать следующим образом:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}\pi n \langle \lambda \rangle}}. \quad (10.16)$$

Учитывая, что  $n = \frac{P}{kT}$ , получим следующее выражение:

$$d = \frac{\sqrt{kT}}{\sqrt{\sqrt{2}\pi \langle \lambda \rangle P}}, \quad (10.17)$$

где  $P$  и  $T$  – давление и температура, при которых проводится опыт (определяются по барометру и термометру, находящихся в лаборатории).

***Задание: Вычисление средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой (рисунок 27). Наполните баллон (1) на три четверти водой и плотно закройте пробкой (2), в которую вставлен капилляр (3).

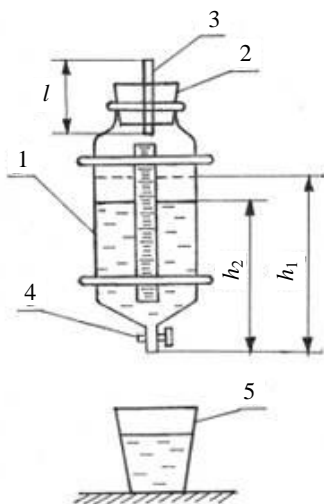


Рисунок 27 – Схема экспериментальной установки

2. Линейкой замерьте первоначальный уровень воды ( $h_1$ ). Откройте кран (4) и одновременно включите секундомер.

3. Когда в мерном стакане (5) будет 100, 200 мл воды ( $1 \text{ мл} = 10^{-6} \text{ м}^3$ ), закройте кран и одновременно остановите секундомер.

4. Замерьте уровень жидкости ( $h_2$ ) в сосуде. Объем вытесненной из баллона воды в мерном стакане будет равен объему воздуха, вошедшего в баллон через трубку (3).

5. Рассчитайте среднюю длину свободного пробега молекул воздуха, используя формулу разности давлений:

$$\Delta P = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (10.18)$$

где  $\rho$  – плотность воды.

Расчет значения  $\langle \lambda \rangle$  удобнее вести по формуле (10.15), записанной в виде

$$\langle \lambda \rangle = A \frac{\Delta P \tau}{V}, \quad (10.19)$$

где  $A$  – постоянная величина для данного опыта, которая равна

$$A = \frac{3\pi r^4}{16P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}. \quad (10.20)$$

6. Опыт повторите 3 раза с одними и теми же значением  $V$  и  $h_1$ .

7. По формуле (10.17) рассчитайте эффективный диаметр молекул воздуха. Давление и температуру воздуха в лаборатории определяют по показаниям барометра и термометра.

8. Методом расчета погрешностей косвенных измерений найдите относительную ( $\epsilon$ ) и абсолютную ( $\Delta \lambda$ ) погрешности средней длины свободного пробега молекул воздуха. Для простоты расчетов используйте только формулы (10.18) и (10.19), считая, что вклад постоянной  $A$  в погрешность измерений незначителен:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta\lambda}}{\overline{\lambda}} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 + h_2} + \frac{\Delta\tau}{\tau} + \frac{\Delta V}{V}; \quad (10.21)$$

$$\Delta\lambda = \varepsilon \langle \lambda \rangle, \quad (10.22)$$

где  $\Delta\rho$  и  $\Delta g$  – абсолютные погрешности табличных величин;

$\Delta h_1, \Delta h_2$  и  $\Delta V$  – абсолютные погрешности прямых однократных измерений, зависящих от цены деления измерительных приборов;

$\Delta\tau$  – абсолютная погрешность прямых многократных измерений времени.

9. Результаты измерений оформите в виде таблицы 13 (молярная масса молекул воздуха равна  $29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, плотность воды –  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>, постоянная Больцмана –  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, молярная газовая постоянная –  $8,31$  Дж/моль  $\cdot$  К, 1 мм рт. ст. –  $133$  Па).

Таблица 13 – Результаты измерений

Номер опыта	$t$ , с	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$\Delta P$ , Па	$V$ , м <sup>3</sup>	$\langle v \rangle$ , м/с	$\Delta\lambda$ , м	$\varepsilon$ , %	$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda$ , м	$\langle d \rangle$ , м
-------------	---------	-----------	-----------	-----------------	----------------------	---------------------------	---------------------	-------------------	---	-------------------------

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие рабочие формулы используются для расчета средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха? (Поясните смысл всех величин, входящих в эти формулы.)

2. Что представляет собой рабочая установка для определения средней длины пробега молекул газа и каков принцип ее действия?

3. Что называется эффективным диаметром и эффективным сечением молекулы?

4. Что называют длиной свободного пробега молекул газа?

5. Как можно вывести формулу для расчета  $\langle \lambda \rangle$  ?

## **Лабораторная работа 11**

### **Определение плотности материалов**

**Цель работы:** изучить классические методы экспериментальных исследований плотности материалов различного агрегатного состояния и происхождения, закрепить практические навыки их применения.

### ***Материальное обеспечение***

1. Весы.
2. Денсиметр (ареометр).
3. Стеклянная химическая посуда (стаканы, цилиндры).
4. Измерительные и резательные приборы (линейки, штангенциркули, ножи).
5. Термометры.
6. Натуральные образцы (свежие и отварные картофель, морковь, свекла), рассол, металлические, полимерные, деревянные и резиновые образцы.

### *Теоретические сведения*

*Плотностью* называют количество массы данного вещества в единице объема. Единицей измерения плотности является килограмм на метр кубический ( $\text{кг/м}^3$ ). Плотность характеризует идентичность, чистоту и концентрацию вещества. Для многих веществ (глицерин, спирт и других) установлена зависимость между плотностью и концентрацией. Зная плотность вещества, по специальной таблице можно найти концентрацию, и наоборот.

Различают плотность абсолютную и относительную.

*Абсолютной плотностью* называют массу вещества, содержащуюся в единице объема.

*Относительная плотность* – величина безразмерная, которую определяют как отношение массы вещества к массе чистой воды при  $4^\circ\text{C}$  в одинаковом объеме.

Для измерения плотности вещества используют такой прибор, как денсиметр.

*Денсиметр (ареометр)* представляет собой стеклянный цилиндрический сосуд, нижняя часть которого заканчивается шаром, заполненным свинцовой дробью. На цилиндрической части денсиметра нанесена шкала с делениями, обозначающими плотности жидкостей, в которые он погружается.

Некоторые конструкции денсиметров снабжены температурной шкалой. Градуировку денсиметров проводят при  $20^\circ\text{C}$  и относят к плотности воды при  $4^\circ\text{C}$ .

Ареометр для определения плотности молока называется лактоденсиметром.

Существует несколько методик определения абсолютной плотности материалов.

Техника определения плотности *классическим методом обмера и*

*взвешивания* состоит в том, что с помощью измерительных приборов (линейка, штангенциркуль), исключая вариант разрушения образца, определяют показатели, необходимые для определения объема образца, исходя из геометрии последнего: длину, высоту, ширину и т. д.

Объем образца определяют, пользуясь штангенциркулем (при размерах образца менее 100 мм) или металлической линейкой (при больших размерах).

Если образец имеет кубическую форму или форму параллелепипеда, то каждую грань измеряют в трех местах. Окончательный размер каждой грани ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) вычисляют как среднее арифметическое трех измерений. Объем подсчитывают по формуле  $V = abc$ .

При вычислении объема цилиндрического образца определяют его диаметр и высоту ( $H$ ). Для этого на параллельных основаниях цилиндра наносят два взаимно перпендикулярных диаметра. Диаметр образца находят как среднее арифметическое результатов четырех измерений.

Высоту цилиндра вычисляют так же, как среднее арифметическое результатов четырех измерений, образующих цилиндр и расположенных на концах взаимно перпендикулярных диаметров. Объем цилиндра рассчитывают по формуле  $V = \pi d^2 \cdot \frac{H}{4}$ .

Среднюю плотность образцов неправильной геометрической формы определяют *методом гидростатического взвешивания* или с помощью *объемомера*.

Метод гидростатического взвешивания основан на использовании закона Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вверх и равная весу вытесненной им жидкости.

Чтобы определить выталкивающую силу, образец взвешивают на воздухе и в жидкости; разность массы дает значение выталкивающей силы. Зная плотность жидкости, по выталкивающей силе можно вычислить объем вытесненной образцом жидкости, т. е. объем образца. Так как плотность воды равна  $1 \text{ кг/м}^3$ , при взвешивании в воде значение выталкивающей силы в граммах численно равно значению объема образца в метрах кубических.

Зная массу и объем образца, вычисляют его среднюю плотность по формуле

$$\rho = m : V, \quad (11.1)$$

где  $m$  – масса образца на воздухе (кг).

Техника определения плотности *с помощью денсиметра (ареометра)* (рисунок 28) состоит в следующем. В чистый цилиндр (2) внутреннего диаметра 5 см наливают испытуемую жидкость (3). Стараясь не задеть стенки цилиндра, в жидкость медленно вводят чистый и сухой денсиметр (1). Держа его за верх, ожидают 2–3 мин, чтобы денсиметр пришел в равновесие (при этом он не должен касаться ни дна, ни стенок цилиндра).

Деления на денсиметре отсчитывают по верхнему краю мениска и замеряют температуру исследуемой жидкости с помощью термометра, опущенного в цилиндр.

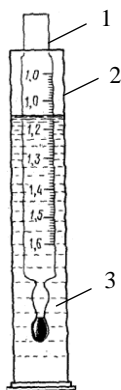


Рисунок 28 – Измерение денсиметром

Если температура испытуемого материала отличается от 20°C (выше или ниже), а денсиметр градуирован на эту температуру, проводят поправку на найденную плотность с учетом поправочного коэффициента.

Допустимое отклонение между двумя параллельными определениями не должно превышать 0,001.

Денсиметры содержатся в сухом чистом виде, поэтому после применения их надо промыть водой (или растворителем) и вытереть насухо.

**Задание: Определение плотности образцов**



Задание выполните в следующем порядке:

1. Изучив методику определения плотности методом обмера и взвешивания, определите этот показатель натуральных полимерных, металлических, деревянных и резиновых образцов различной конфигурации.

Для расчета объема исследуемых образцов используйте формулы, приведенные в приложении К. Плотность некоторых веществ представлена в приложении Л.

Итоговые результаты оформите в виде таблицы 14.

Таблица 14 – Определение плотности образца методом обмера и взвешивания

Наименование образца	$m$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
----------------------	----------	----------------------	----------------------------

2. Проанализируйте данные таблицы 14 и расположите образцы в порядке убывания плотности. Сделайте письменные выводы, уязвав особенности строения образцов с полученными результатами.

3. Методом обмера и взвешивания определите плотность моркови, свеклы и картофеля до и после термической обработки (варки). Результаты исследований представьте в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Результаты экспериментальных исследований плотности свежих и термически обработанных овощей

Наименование образца	Наличие термической обработки	$m$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
----------------------	-------------------------------	----------	----------------------	----------------------------

4. С помощью вертикально ориентированной столбиковой диаграммы представьте итоговые значения плотности свежих и термически обработанных овощей из таблицы 15. Рассчитайте процент увеличения (или уменьшения) значения плотности в овощах после термической обработки и обоснуйте полученные результаты.

5. Изучив методику определения плотности ареометрическим методом, определите плотность образцов рассола с учетом их температуры (последняя должна соответствовать температуре, для которой градуирован ареометр). При отклонении вносятся поправки: на каждый градус разницы температуры – 0,000 45 показания ареометра. Если температура выше требуемой, то поправка прибавляется, если ниже, то вычитается.

6. Используя экспериментальное итоговое значение плотности, определите концентрацию соли в рассоле (приложение М).

7. Результаты измерений оформите в виде таблицы 16.

Таблица 16 – Результаты определения плотности и концентрации соли в рассоле

Номер измерения	Температура образца, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Содержание поваренной соли в 100 мл рассола, %
		Показание ареометра	Значение с учетом поправочного коэффициента	

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие известны разновидности плотности вещества?
2. Что называют абсолютной плотностью вещества? В каких единицах она измеряется?
3. Что понимают под относительной плотностью вещества? В каких единицах она измеряется?
4. Какие показатели взаимосвязаны с плотностью вещества?
5. Каковы конструктивные особенности денсиметра (ареометра)?
6. Для образцов какого агрегатного состояния применим ареометрический метод определения плотности? В чем состоит сущность этого метода?
7. Как называется ареометр, используемый при определении плотности молока?
8. С помощью каких методов определяют плотность твердого тела?

## **ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

### **Лабораторная работа 12 Изучение электроизмерительных приборов**

**Цель работы:** изучить электроизмерительные приборы, их классификацию и принцип действия.

### ***Материальное обеспечение***

Электроизмерительные приборы.




### ***Теоретические сведения***

*Электроизмерительным прибором* называется устройство, служащее для измерения электрических величин.

По принципу действия электроизмерительные приборы делятся на магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, термоэлектрическую, электростатическую, вибрационную и электронную системы. Краткое описание и обозначение основных указанных систем на шкале прибора приведено в таблице 17.

Таблица 17 – Системы электроизмерительных приборов






Наименование системы	Условные обозначения	Род тока	Приборы системы
Магнитоэлектрическая*		Постоянный	Гальванометры, миллиамперметры, милливольтметры, регистрирующие приборы
Электромагнитная**		Постоянный и переменный	Щитовые амперметры и вольтметры, фазометры
Электродинамическая***		Постоянный и переменный	Миллиамперметры переменного тока, переносные амперметры и вольтметры, ваттметры
Электродинамическая со сталью (ферродинамическая)		Переменный	Регистрирующие амперметры, вольтметры и ваттметры






Индукционная		Переменный	Счетчики электрической энергии
Вибрационная		Переменный	Герцметры в цепях переменного тока технической частоты
Электростатическая		Постоянный и переменный	Вольтметры и киловольтметры
<p>*Самые чувствительные из всех систем, самые точные приборы постоянного тока (шкала прибора равномерная).</p> <p>**Самые прочные и дешевые приборы с относительно низкой чувствительностью (шкала прибора неравномерная).</p> <p>***Самые точные приборы переменного тока (шкала неравномерная).</p>			

Другие условные обозначения на шкалах приборов представлены в таблице 18.

Рабочая часть прибора начинается от 15–20% шкалы.

Таблица 18 – Условные обозначения, применяемые на шкалах электроизмерительных приборов

Условное обозначение	Содержание обозначения	Условное обозначение	Содержание обозначения
<b>1,5</b>	Класс точности прибора 1,5		Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
	Выпрямительный преобразователь		Прибор нормально работает в вертикальном положении
	Прибор предназначен для работы в цепях постоянного тока		Прибор нормально работает в горизонтальном положении

	Трехфазный ток		Зажим для заземления
	Переменный одно- фазный ток		Прибор нормально работает под углом 60°
<b>~50</b>	Прибор нормально работает при частоте 50 Гц		Вторая категория за- щищенности прибора от влияния внешних магнитных полей

*Погрешности измерений (ошибки измерений)* – это отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемых величин. Представление о точности измерений электроизмерительным прибором дает относительная погрешность, которая исчисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} 100\%, \quad (12.1)$$

где  $\Delta A$  – абсолютная погрешность (разность между показаниями прибора ( $A$ ) и истинным значением ( $A_{ист}$ ) измеряемой величины).

Отношение минимальной абсолютной погрешности к предельному (максимальному) значению измеряемой величины ( $A_{max}$ ) данным прибором называется *приведенной относительной погрешностью* ( $\varepsilon_{пр}$ ), определяемой по формуле

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{max}} 100\%. \quad (12.2)$$

Приведенная относительная погрешность, выраженная в процентах, определяет класс точности прибора. Применяются следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Обозначение класса точности записывается на его шкале в виде соответствующих цифр. Иногда класс точности обозначается числом в кружке.

Приборы класса точности 0,05 дают наименьшую относительную погрешность измерения и используются в лабораторных исследованиях, а также как образцовые приборы для проверки менее точных приборов.

Приборы остальных классов (0,1–4,0) относятся к техническим.

Зная класс точности прибора, можно найти относительную погрешность конкретного измерения:

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\max}}{X} 100\%, \quad (12.3)$$

где  $X_{\max}$ ,  $X$  – показания прибора.

Общая формула для расчета минимальной абсолютной погрешности имеет вид

$$\Delta A_{\min} = \frac{\gamma}{100} A_{\max}, \quad (12.4)$$

где  $\gamma$  – класс точности прибора.

Из вышесказанного следует, что чем ближе измеряемая величина к предельному значению прибора, тем меньше относительная ошибка и тем она ближе к значению класса точности прибора.

Электроизмерительный прибор или его предел для работы следует выбирать так, чтобы значение измеряемой величины было близким к предельному (наибольшему) значению шкалы прибора.

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его внутреннее сопротивление ( $R_{np}$ ), определяемое по формуле

$$R_{np} = \frac{U_{\max}}{I_{\max}}, \quad (12.5)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное падение напряжения на измерительном приборе;

$I_{\max}$  – максимальное допустимое значение силы тока, протекающего через прибор.

Через измерительный механизм рассмотренных выше электроизмерительных приборов, особенно магнитоэлектрической системы, можно пропускать очень слабый ток.

Однако прибор можно использовать для измерения больших токов, если параллельно измерительному механизму подключить дополнительное малое сопротивление, которое называют *шунтом*.

Шунты изготавливаются из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления и имеют форму спиралей, лент или

стержней. Если к прибору подключить несколько шунтов, то это даст возможность иметь несколько пределов измерения силы тока. Такой прибор называется *многопредельным амперметром*.

Многопредельный прибор, как правило, имеет переключатель на несколько пределов измерения (пределы указаны около ручки переключения), одну общую клемму (\*) и ряд других клемм («1», «2» и т. д.), около которых указаны пределы измерений.

Если последовательно с измерительным механизмом подключить добавочное большое сопротивление, то прибор может быть использован в качестве *вольтметра* – прибора для измерения напряжения.

Вольтметр в электрическую цепь включается параллельно тому участку, на котором измеряется напряжение.

Для сохранения целостности и работоспособности многопредельного электроизмерительного прибора, например амперметра, при включении его в электрическую цепь с неизвестной силой тока следует придерживаться следующих правил:

- С помощью ручки установки пределов устанавливается максимальный предел измерения на приборе.
- Если при замыкании цепи отклонение стрелки амперметра будет незначительным, нужно последовательно уменьшать пределы измерения до тех пор, пока отклонение стрелки не окажется в правой части шкалы, где точность измерения будет больше (погрешность меньше).
- Для выбранного предела определяют цену одного деления шкалы амперметра по формуле

$$Z = \frac{I_{\max}}{m}, \quad (12.6)$$

где  $Z$  – цена одного деления шкалы амперметра для выбранного предела измерений;

$m$  – число всех делений шкалы прибора.

- Величина измеряемого тока (напряжения) вычисляется следующим образом:

$$I = Zk, \quad (12.7)$$

где  $k$  – деление шкалы прибора, на которое отклонится стрелка при включении прибора в электрическую цепь.

Аналогично определяется цена деления вольтметра.

### ***Задание: Изучение электроизмерительных приборов***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Изучите предложенные электроизмерительные приборы, расшифруйте условные обозначения.
2. По результатам изучения приборов самостоятельно составьте сводную таблицу.
3. Письменно ответьте на следующие вопросы:
  - Каково будет значение сопротивления шунта к миллиамперметру на 100 мА для измерения тока до 2 А ( $R_A = 0,1 \text{ Ом}$ )?
  - Каково будет значение добавочного сопротивления к милливольтметру на 100 мВ для измерения напряжения до 10 В ( $R_V = 2 \text{ кОм}$ )?
  - Для измерений тока использовался двухпредельный миллиамперметр на 300 мА и 750 мА. Шкала прибора имеет 150 делений. Какова будет цена делений шкалы прибора для каждого предела измерений?
4. Сформулируйте выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. По каким признакам классифицируются электроизмерительные приборы?
2. Каково будет значение абсолютной погрешности вольтметра с пределами измерений 3, 15, 75 В и классом точности 1,5?
3. В чем заключаются особенности устройства и принципа действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем?
4. Почему шкала у одних электроизмерительных приборов равномерная, у других – неравномерная?
5. В чем заключаются особенности устройства и принципа действия аstaticеского прибора?

## **Лабораторная работа 13**

### **Изучение закона Ома для постоянного и переменного тока**

***Цель работы:*** изучить закон Ома для постоянного и переменного тока.



## *Материальное обеспечение*

Стенд с активным сопротивлением, вольтметром, амперметром и реостатом.

## *Теоретические сведения*

Известно, что сила тока численно равна заряду ( $dq$ ), проходящему через данное поперечное сечение проводника за единицу времени ( $dt$ ):

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (13.1)$$

*Линиями тока* являются траектории направленного движения положительных электрических зарядов, касательные к которым показывают направление скорости упорядоченного движения заряда.

Линии тока связывают с плотностью тока.

*Плотность тока* – векторная характеристика электрического тока, численно равная отношению силы тока сквозь малый элемент поверхности, нормальный к направлению движения заряженных частиц, образующих ток, к площади этого элемента.

Плотность тока ( $j$ ) рассчитывается по формуле

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad (13.2)$$

где  $S$  – поперечное сечение проводника.

Выразим плотность тока через среднюю скорость ( $v_{cp}$ ) упорядоченного движения свободных зарядов в проводнике, концентрацию свободных зарядов –  $n$ , элементарный заряд –  $e$ , тогда за время  $dt$  через поперечное сечение проводника переносится заряд:

$$dq = nev_{cp}Sdt.$$

Сила тока согласно формуле (13.1) будет определяться по следующей формуле:

$$I = nev_{cp}S.$$

В свою очередь, плотность тока будет равна:

$$j = nev_{cp}. \quad (13.3)$$

Ток, сила и направление которого не изменяются со временем, называется *постоянным*. Единицей силы тока является ампер (А), единицей плотности тока – ампер на метр квадратный (А/м<sup>2</sup>).

Если вектор плотности тока ( $\vec{j}$ ) составляет с положительной нормалью ( $\vec{n}$ ) к элементу сечения ( $dS$ ) угол  $\alpha$ , то  $j_n = j \cos \alpha = \frac{dI}{dS}$ . Отсюда следует, что ток, проходящий через всю поверхность, равен:

$$I = \int_S j_n dS. \quad (13.4)$$

Для того чтобы постоянный ток протекал по проводнику, необходимо на его концах поддерживать разность потенциалов. Это осуществляется источниками тока. Разделение зарядов в источнике производится с помощью внешних, или сторонних, сил.

*Электродвижущей силой (ЭДС)* источника тока называют величину, численно равную работе сторонних сил ( $A_c$ ) при перемещении единичного положительного заряда по всей цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_c}{q}, \quad (13.5)$$

где  $\mathcal{E}$  – электродвижущая сила;  
 $q$  – значение заряда.

Электродвижущая сила является скалярной величиной, которая может быть как положительной, так и отрицательной. Знак ЭДС зависит от направления тока в цепи и выбора направления обхода цепи.

Работа электрического тока по перемещению заряда по проводнику совершается кулоновскими ( $A_e$ ) и сторонними силами, поэтому полная работа будет исчисляться по формуле

$$A = A_e + A_c.$$

Физическая величина, численно равная отношению работы, совершаемой электрическим полем при перемещении положительного заряда из одной точки в другую, к значению заряда, называется *напряжением* ( $U$ ) между этими точками.

Напряжение определяется по формулам

$$U = \frac{A}{q}; \quad (13.6)$$

$$U = \frac{A_e}{q} + \frac{A_c}{q}. \quad (13.7)$$

Учитывая, что выражение  $\frac{A_c}{q}$  равно разности потенциалов между двумя точками стационарного электростатического поля ( $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ , где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы начальной и конечной точек траектории заряда), а  $\frac{A_e}{q} = \mathcal{E}$ , получим следующую формулу:

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}. \quad (13.8)$$

В случае электростатического поля, когда на участке не приложена ЭДС ( $\mathcal{E} = 0$ ), напряжение между двумя точками равно разности потенциалов:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (13.9)$$

При разомкнутой электрической цепи ( $I = 0$ ) напряжение равно ЭДС источника ( $U = \mathcal{E}$ ).

Единицей напряжения в СИ является вольт (В),  $V = \text{Дж/Кл}$ .

Экспериментально установленный закон Ома определяет, что сила тока в проводнике пропорциональна напряжению между концами этого проводника и выражается формулой

$$I = kU, \quad (13.10)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый электропроводностью, или проводимостью проводника.

Величина, обратная проводимости, называется *электрическим сопротивлением* проводника:

$$R = \frac{1}{k}. \quad (13.11)$$

Подставляя в формулу (13.10) выражение (13.11), получим:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (13.12)$$

Соотношение (13.12) выражает *закон Ома для участка цепи* (не

содержащего источника тока).

Электрическое поле ( $E$ ), возникшее в проводнике, равно:  $E = \frac{U}{l}$ ,

а плотность тока  $-j = \frac{I}{S}$ . Подставляя эти выражения в формулу закона Ома, получим следующую формулу:

$$\frac{El}{jS} = R. \quad (13.13)$$

Исходя из вышеизложенного плотность тока будет равна:

$$j = \frac{l}{RS} E = \frac{E}{\rho} = \sigma E, \quad (13.14)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость проводника, равная  $\frac{1}{\rho}$  ( $\rho$  – удельное сопротивление проводника).

Выражение (13.14) можно записать в векторной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (13.15)$$

Уравнение (13.15) представляет собой *закон Ома в дифференциальной форме*, связывающий плотность тока в любой точке ЭДС внутри проводника с напряженностью электрического поля в той же точке.

Учитывая выражения (13.6) и (13.12), получим *закон Ома для полной (замкнутой) цепи*, выражающий связь между силой тока в цепи, ЭДС и полным сопротивлением цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (13.16)$$

где  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока;

$R$  – внешнее сопротивление.

Внешнее сопротивление проводника может состоять из нескольких омических сопротивлений.

Для разветвленных электрических цепей можно применять следующие правила Кирхгофа:

- Алгебраическая сумма силы тока в узле разветвления равна нулю

$$\left( \sum_{i=1}^n I_i = 0 \right).$$

- Алгебраическая сумма падения напряжения в произвольном замкнутом разветвленном контуре равна алгебраической сумме ЭДС

этого контура  $\left( \sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i \right).$

Рассмотрим, как формулируется *закон Ома в цепи переменного тока*. Если к концам проводника с активным сопротивлением ( $R_0$ ) приложена переменная электродвижущая сила, величина которой в данный момент времени определяется уравнением:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \quad (13.17)$$

где  $\mathcal{E}_0$  – амплитуда электродвижущей силы;

$\omega$  – круговая частота тока;

$\omega t$  – фаза тока,

то в нем возникает переменный электрический ток, сила которого в тот же момент определяется по закону Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_0} = \left( \frac{\mathcal{E}_0}{R_0} \right) \cdot \sin \omega t = I_0 \sin \omega t \quad \left( I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{R_0} \right), \quad (13.18)$$

где  $I_0$  – максимальное значение тока;

$R_0$  – максимальное значение сопротивления.

Если же помимо сопротивления в цепи имеется индуктивность, характеризуемая коэффициентом самоиндукции ( $L$ ), то под действием той же электродвижущей силы возникает ток силой:

$$I = I_0 \sin (\omega t - \varphi). \quad (13.19)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}}, \quad (13.20)$$

где  $\varphi$  – сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый из формулы

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R_0}. \quad (13.21)$$

Из сопоставления уравнений (13.17) и (13.20) следует, что в этом случае ток отстает по фазе от напряжения.

Величина  $R_1 = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L^2}$  носит название сопротивления, так как она играет роль, что и обычное активное сопротивление в формуле закона Ома. Величина  $\omega L$  называется *индуктивным сопротивлением*.

Если вместо самоиндукции в цепь переменного тока включена емкость ( $C$ ), то сила тока выражается формулой

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (13.22)$$

где

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}. \quad (13.23)$$

Соответственно, тангенс угла будет исчисляться следующим образом:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R_0 \cdot \omega C}. \quad (13.24)$$

В этом случае сила тока опережает по фазе напряжение.

Сопротивление цепи ( $R_2$ ) теперь выразим с помощью формулы

$$R_2 = \sqrt{R_0^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (13.25)$$

При этом величина  $\frac{1}{\omega C}$  называется *емкостным сопротивлением*.

В случае, когда в цепь включены последовательно все 3 величины ( $R_0$ ,  $L$  и  $C$ ), сила тока в цепи может быть выражена следующим образом:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (13.26)$$

где

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (13.27)$$

Соответственно, тангенс угла будет равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_0}. \quad (13.28)$$

Полное сопротивление в этом случае исчисляется по следующей формуле:

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (13.29)$$

Формула (13.29) носит название *закона Ома для переменного тока*.

Следует отметить, что измеряемое приборами *эффективное значение тока* ( $I_{\text{эф}}$ ) связано с максимальным посредством формулы

$$I_0 = I_{\text{эф}} \sqrt{2}. \quad (13.30)$$

Эффективный и постоянный ток производят одинаковый внешний эффект, например, выделяют в проводнике одинаковое количество джоулевой теплоты.

Аналогично эффективному току вводится понятие *эффективного (действующего) напряжения* ( $U_{\text{эф}}$ ), связанного с максимальным следующим образом:

$$U_0 = U_{\text{эф}} \sqrt{2}, \quad (13.31)$$

где  $U_0$  – максимальное (амплитудное) значение переменного напряжения.

Обычно электроизмерительные приборы показывают эффективные значения переменного тока и напряжения.

### ***Задание: Изучение закона Ома для постоянного и переменного тока***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь со схемой для изучения закона Ома (рисунок 29).

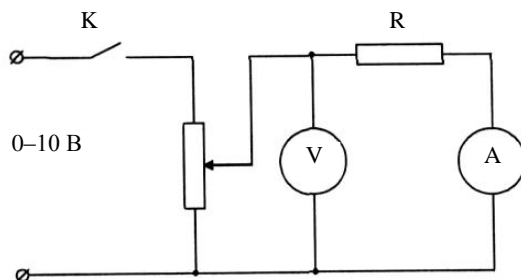


Рисунок 29 – Электрическая схема для изучения закона Ома

2. Переключите вольтметр на диапазон 7,5 В.
3. Изменяя напряжение в цепи от 1,5 до 7,5 В с шагом по 0,5 В, фиксируйте силу тока на микроамперметре.
4. Результаты измерений оформите в виде таблицы 19. Опыт повторите 3 раза.

Таблица 19 – Измерение силы тока

$U$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$I_{cp}$ , А	$R$ , Ом
---------	-----------	-----------	-----------	--------------	----------

5. Переключите вольтметр на диапазон 15 В.
6. Меняя резистором силу тока от 0,2 до 0,8 мА с шагом 0,1 мА, фиксируйте показания напряжения на вольтметре.
7. Полученные результаты измерений представьте в виде таблицы 20. Опыт повторите 3 раза.

Таблица 20 – Измерение напряжения

$I$ , А	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_{cp}$ , В	$R$ , Ом
---------	-----------	-----------	-----------	--------------	----------

8. Определите активное сопротивление в цепи постоянного тока по закону Ома для обоих экспериментов.
9. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности.
10. Сформулируйте выводы.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Как формируются законы Ома для участка и для полной цепи?
2. Как выражается закон Ома в дифференциальной форме? Что называют эффективным значением тока и напряжения?
3. Что означают понятия «удельная электропроводность» и «плотность тока»? В каких единицах они измеряются?
4. Что называют напряженностью электрического поля и в каких единицах она определяется?
5. Каково определение понятия «сила тока»? (Укажите единицу



измерения.)

6. Что называют напряжением электрического поля и в каких единицах оно измеряется?

7. Как формулируются правила Кирхгофа?

## **Лабораторная работа 14** **Изучение электронного осциллографа,** **получение фигур Лиссажу**

**Цель работы:** изучить электронный осциллограф, научиться получать фигуры Лиссажу и проводить градуировку генератора по фигурам Лиссажу.

### ***Материальное обеспечение***

1. Осциллограф электронного типа СИ-20.
2. Генераторы звуковых частот типа 13-34, 13-18.

### ***Теоретические сведения***

*Колебаниями* называют движения, обладающие той или иной степенью повторимости во времени. По своей физической природе они могут быть весьма разнообразны (механические, электрические и др.).

Колебания называются *периодическими*, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебания, повторяются через равные промежутки времени, т. е. периоды колебаний.

Следовательно, *период колебаний* – это время одного полного колебания. Число полных колебаний в единицу времени называется *частотой колебаний*. Период и частота связаны следующим образом:

$$T = \frac{1}{f}, \quad (14.1)$$

где  $T$  – период (с);  
 $f$  – частота.

Единицей измерения частоты в СИ является герц ( $\Gamma\text{ц} = 1/\text{с}$ ).

На практике чаще используют понятие «циклическая частота», исчисляемая по формуле

$$\omega = 2\pi f. \quad (14.2)$$

Простейший тип периодических колебаний представляют *гармонические колебания*, происходящие по закону синуса и косинуса. Они выражаются уравнениями

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0); \quad (14.3)$$

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (14.4)$$

где  $x$  – значение колеблющейся физической величины в момент времени  $t$ ;

$A$  – максимальное значение  $x$ , называемое амплитудой колебаний.

Выражение, стоящее под знаком «sin» или «cos», определяет значение  $x$  в данный момент времени и называется *фазой колебаний*.

При  $t = 0$  фаза равна  $\varphi_0$ , которая называется *начальной фазой*.

Графическое изображение синусоидального гармонического колебания представлено на рисунке 30.

Если одновременно совершаются 2 колебания (гармонические колебания), имеющие разные частоты и амплитуды ( $x_1 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$  и  $x_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ ), результирующее колебание уже не является гармоническим.

В случае радиального отношения частот графические изображения такого колебания будут представлять собой замкнутую кривую, называемую *фигурой Лиссажу*.

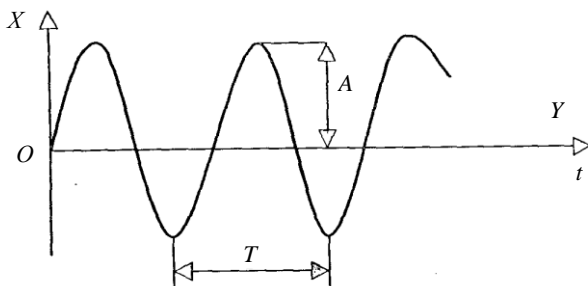


Рисунок 30 – Изображение гармонического колебания синусоидального типа

Последняя заключена внутри прямоугольника, стороны которого параллельны осям  $OX$  и  $OY$ , и соответственно, равны  $2A_1$ ,  $2A_2$ .

Отношение частот  $\omega_1/\omega_2$  равно отношению частот числа касаний фигуры Лиссажу с горизонтальной и вертикальной сторонами прямоугольника, в который она вписывается. В качестве примера можно привести образование фигуры Лиссажу для  $\omega_1 = \omega_2$ , которая представ-

ляет собой эллипс. Для более сложных соотношений фигуры Лиссажу представляют собой еще более сложный вид (рисунок 31).

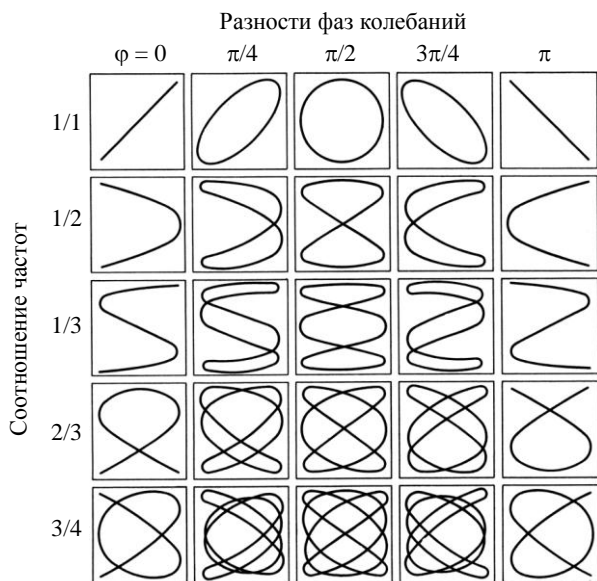


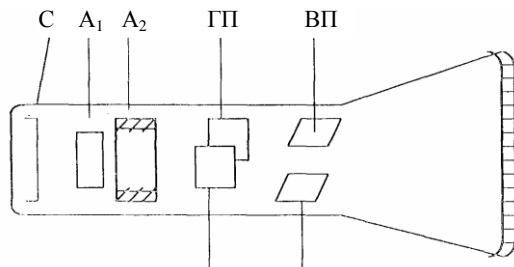
Рисунок 31 – **Фигуры Лиссажу для различных соотношений частот и разностей фаз**

Анализ фигур Лиссажу – один из наиболее используемых методов исследования соотношений частот и разностей фаз складываемых колебаний, а также форм колебаний.

Установка для получения фигур Лиссажу состоит из электронного осциллографа и двух генераторов электромагнитных колебаний звуковой частоты, которые служат источниками электромагнитных колебаний. Осциллограф предназначен для визуального наблюдения как самих колебаний, так и результатов их сложения.

Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (рисунок 32). Под действием тепла на катоде происходит термоэлектронная эмиссия – вырывание электронов из материала катода. Вылетевшие электроны образуют вокруг катода электронное облако. Если на анод подать положительный потенциал, электроны начнут ускоренно двигаться под действием поля к аноду и далее на экран. Расположенное между катодом и анодом фокусирующее устройство (например, электромагнитная линза) собирает их в узкий пучок. Экран покрыт особым веществом – люминофором, которое начинает светиться при попадании на него электронов. Таким образом, в месте

попадания электронного пучка на экран мы видим светящуюся точку.



Условные обозначения:

С – управляющий электрод; А<sub>1</sub> – фокусирующий анод;  
А<sub>2</sub> – ускоряющий анод; ГП – горизонтально отклоняющиеся пластины;  
ВП – вертикально отклоняющиеся пластины.

Рисунок 32 – Схема электронно-лучевой трубки

Пластины ГП и ВП (см. рисунок 32) представляют собой конденсаторы, электрическое поле которых отклоняет электронный луч вправо-влево и вверх-вниз. Светящаяся точка при этом начинает двигаться (перемещаться) по экрану. Если требуется наблюдать изображение некоторого сигнала на осциллографе (например, от звукового генератора), его подают на ВП, а на ГП – так называемое напряжение развертки пилообразной формы (рисунок 33).

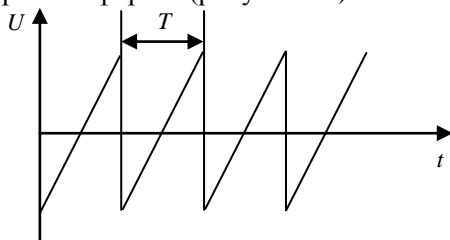


Рисунок 33 – Изображение развертки пилообразной формы

Под действием напряжения развертки светящаяся точка в течение времени  $t$  совершает равномерное движение по экрану в горизонтальном направлении, затем практически мгновенно возвращается обратно.

Если период напряжения развертки подобрать так, чтобы  $T_{uc} = nT$  (где  $T_{uc}$  – период исследуемого сигнала, подаваемого на отклоняющиеся пластины), то на экране мы получим неподвижное изображение, содержащее  $n$  периодов исследуемого сигнала.

Если на обе отклоняющиеся пластины подать сигналы от двух ге-

нераторов, представляющих гармонические колебания с различными отношениями частот, то на экране мы увидим результат сложения колебаний – фигуру Лиссажу.

***Задание: Получение фигур Лиссажу. Проведение градуировки генератора***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Вращая ручку установки частоты эталонного генератора, получите фигуры Лиссажу для соотношения следующих частот:  $1/1$ ,  $1/2$ ,  $2/1$ ,  $1/3$ ,  $3/1$ . Изобразите полученные фигуры.

2. Проведите градуировку исследуемого генератора по фигурам Лиссажу (которые задаются преподавателем). Для этого на шкале частот градуируемого генератора поставьте первую условную точку.

***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют гармоническим колебанием? (Приведите формулу и графическое изображение.)

2. Что означают понятия «частота» и «период колебаний»? В каких единицах они измеряются?

3. Что называют амплитудой и фазой колебаний? В каких единицах они измеряются?

4. Что представляет собой фигура Лиссажу? (Поясните графическое изображение фигуры Лиссажу при соотношении частот  $1/2$ .)

5. Каков будет вид фигуры Лиссажу для  $\omega_1/\omega_2 = 1,3/2 : 2/3$ ?

6. В чем заключается принципиальное устройство электронно-лучевой трубки?

7. Что означает понятие «напряжение разверстки»? Как получить на осциллографе фигуру Лиссажу?

8. Как с помощью фигуры Лиссажу можно определить частоту неизвестного сигнала?

**Лабораторная работа 15**

**Определение емкости конденсатора при помощи моста Сотти**

**Цель работы:** изучить мостиковую схему, научиться определять ее с помощью неизвестную емкость конденсатора.

***Материальное обеспечение***

1. Звуковой генератор.
2. Эталонный конденсатор 20 мкФ.
3. Конденсатор с неизвестной емкостью.
4. Резистор с известным сопротивлением (2 700 Ом), магазин резисторов.
5. Телефон (вольтметр) и соединительные проводники.

### Теоретические сведения

Емкость ( $C$ ) проводника численно равна величине заряда, который нужно сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

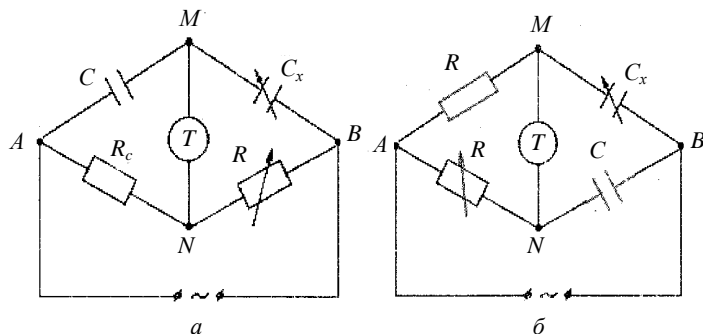
$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (15.1)$$

Емкость проводника зависит от формы, его линейных размеров и диэлектрической проницаемости среды, окружающей проводник. Единицей емкости в СИ является фарад; 1 Ф – емкость проводника, в котором изменение заряда на 1 Кл меняет его потенциал на 1 В.

В электротехнике используют устройства, состоящие из двух или более разноименно заряженных проводников с равными по величине зарядами, называемые *конденсаторами*. В зависимости от формы проводников конденсаторы бывают плоские, сферические, цилиндрические и т. д.

Емкость конденсатора характеризует систему обоих проводников в их взаимном расположении, а не отдельный проводник. Для практики важно уметь точно измерять величину электрической емкости конденсатора. Для этого в электротехнике используют различные методы и схемы. Наиболее точные результаты дают мостовые схемы измерения электроемкости.

В данной работе для определения емкости конденсатора используют мост Сотти, схема которого изображена на рисунке 34.



Условные обозначения:

$T$  – телефонные наушники (или вольтметр);  $C_x$  – неизвестная емкость;

$C$  – известная емкость;  $R_c$  – резистор с известным сопротивлением;

$R$  – магазин резисторов.

Рисунок 34 – Схема моста Сотти

Переменный ток в точке А разветвляется по двум направлениям АМВ и АНВ. В точке М ток вновь разветвляется. Однако, если потенциалы точек М и N одинаковы, то по участку MN ток не потечет, и в телефонные наушники (вольтметр) сигнал, подаваемый звуковым генератором, поступать не будет. Этот процесс можно выразить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} U_A - U_M &= \frac{q}{C}; & U_M - U_B &= \frac{q_x}{C_x}; \\ U_A - U_N &= I_1 R_c; & U_N - U_B &= I_2 R. \end{aligned} \quad (15.2)$$

При условии, что  $U_M = U_N$ , четыре уравнения преобразуются в два:

$$\frac{q}{C} = I_1 R_c; \quad \frac{q_x}{C_x} = I_2 R. \quad (15.3)$$

Если через вольтметр ток не потечет, то конденсаторы  $C$  и  $C_x$  можно считать соединенными последовательно, и тогда  $q = q_x$ . Кроме того, токи в ветвях AN и NB тоже будут равны. Разделив равенство (15.2) на (15.3), учитывая равенство токов в ветвях AN и NB и равенство зарядов конденсаторов, получим следующие выражения:

$$\frac{C_x}{C} = \frac{R_c}{R}, \quad (15.4)$$

или

$$C_x = \frac{R_c}{R} C; \quad (15.5)$$

$$C_x = \frac{R_1}{R_2} C. \quad (15.6)$$

Выражение (15.6) позволяет вычислить емкость неизвестного конденсатора, если в формулу подставить значение сопротивления (подо-

бранное с помощью магазина резисторов), при котором в телефоне отсутствует сигнал (стрелка вольтметра стремится к нулю).

***Задание: Определение емкости конденсатора  
при помощи моста Сотти***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Соберите схему, изображенную на рисунках 34а, 34б.
2. Запишите значение емкости эталонного конденсатора ( $C \pm \Delta C$ ).
3. Запишите значение известного сопротивления ( $R \pm \Delta R$ ).
4. Подключите один конденсатор ( $C_{x1}$ ) и, меняя сопротивление, по показаниям вольтметра добейтесь минимального сигнала. Опыт повторить 4 раза при разных значениях переменного сопротивления. Затем подключите другой конденсатор ( $C_{x2}$ ) и проделайте те же операции.

5. Результаты измерений оформите в виде таблицы 21.

Вычислите значения  $C_x$  по формуле (15.5) (см. рисунок 34а) или по формуле (15.6) (см. рисунок 34б).

Таблица 21 – Результаты измерений сопротивления и электроемкости

Номер измерения	$R_{перем1}$ , Ом	$R_{перем2}$ , Ом	$R_{перем3}$ , Ом	$R_{перем4}$ , Ом	$C_x$ , мкФ
-----------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------

6. Сформулируйте выводы по полученным результатам.

***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют электрической емкостью проводника? В каких единицах она измеряется?
2. От чего зависит емкость проводника?
3. Что называют конденсатором? Как конденсатор изображается в электрических цепях?
4. Как изменится емкость конденсатора, если напряжение на его зажимах повысится?
5. Какую формулу нужно применить для определения емкости плоского конденсатора?
6. Как изменится электроемкость плоского конденсатора, если заряд на его пластинах увеличить в 4 раза?
7. Как изменится электрическая емкость плоского конденсатора, если площадь его пластин увеличить в 3 раза?



# ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## Лабораторная работа 16

### Определение показателя преломления твердых тел и линейных размеров малых объектов с помощью микроскопа

**Цель работы:** изучить устройство микроскопа, освоить методы определения показателя преломления твердых прозрачных тел и линейных размеров малых объектов с помощью микроскопа.

#### Материальное обеспечение

1. Микроскоп.
2. Линейка.
3. Микрометр.

#### Теоретические сведения

Если рассматривать предмет через плоскопараллельный слой прозрачного вещества, то вследствие преломления световых лучей на обеих плоских поверхностях слоя предмет будет казаться приподнятым, т. е. расположенным ближе, чем в действительности. Величина поднятия зависит от толщины слоя и показателя преломления вещества.

Рассмотрим некоторую точку на нижней поверхности пластинки, показатель преломления которой нам нужно определить (рисунок 35).

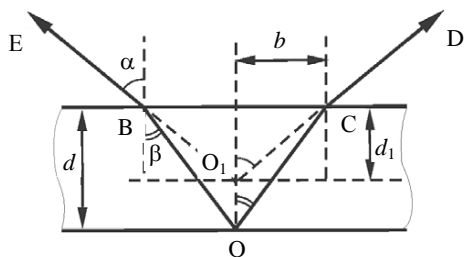


Рисунок 35 – Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

Проведем из точки  $O$  два световых луча  $OB$  и  $OC$ . После выхода из пластинки они пойдут по направлениям  $CD$  и  $BE$ . Наблюдая сверху, мы увидим изображение точки  $O$  на пересечении продолжений лучей  $CD$  и  $BE$  в точке  $O_1$ . Точка  $O_1$  оказывается ближе к поверхности на

величину отрезка  $OO_1$ .

Пусть  $d$  – истинная толщина пластинки,  $d_1$  – кажущаяся толщина пластинки. Найдем количественную связь между показателем преломления пластинки  $n$ , толщиной  $d$  и величиной  $d_1$ . Из рисунка видно, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{b}{d_1}, \operatorname{tg} \beta = \frac{b}{d}; \\ \frac{d}{d_1} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \end{aligned} \quad (16.1)$$

Используя закон преломления ( $\sin \alpha : \sin \beta = n$ ), получим:

$$\frac{d}{d_1} = n \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}. \quad (16.2)$$

Если ограничиться рассмотрением лучей, близких к нормальному лучу, то при  $\alpha \rightarrow 0$ , соответственно,  $\beta \rightarrow 0$  и  $\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \approx 1$ .

Тогда показатель преломления пластинки будет равен:

$$n = \frac{d}{d_1}. \quad (16.3)$$

Для рассмотрения очень мелких предметов нужно искусственно увеличить угол зрения, что достигается с помощью микроскопа. Ход лучей в микроскопе показан на рисунке 36.

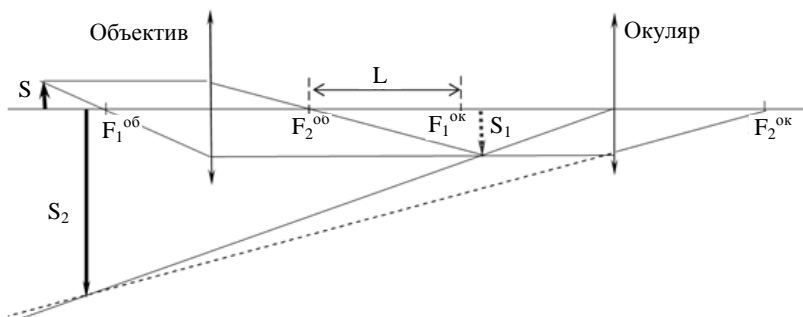


Рисунок 36 – Ход лучей в микроскопе

Рассматриваемый предмет помещается между фокусом и двойным фокусом объектива  $L$ . Изображение  $S$ , даваемое объективом, рассмат-

ривается в окуляр, как в лупу.

Окуляр располагается таким образом, чтобы мнимое увеличение изображения предмета оказалось на расстоянии наилучшего зрения от глаза, т. е. 25 см.

По линейному увеличению объектива ( $F_1 = S_1 : S$ ) и окуляра ( $F_2 = S_2 : S_1$ ) можно вычислить увеличение микроскопа:

$$F = S_2 : S = S_2 S_1 : S S_1 = F_1 F_2.$$

В данной лабораторной работе используется микроскоп МБС-9, внешний вид которого представлен на рисунке 37.



Рисунок 37 – Микроскоп МБС-9

Основной узел прибора – оптическая головка (1), в которую вмонтированы все оптические детали.

Объектив микроскопа (2) крепится снизу к корпусу оптической головки (главный оптический узел). Выше объектива в корпусе оптической головки установлен барабан, в котором смонтировано 5 систем линз.

При помощи рукоятки (3) можно поворачивать барабан и изменять увеличение объектива с выбранной системой линз. Величина результирующего увеличения объективной части приведена на рукоятке: 7, 4, 2, 1 и 6.

Чтобы установить нужное увеличение, достаточно, вращая барабан, совместить цифру на рукоятке с индексом, нанесенным в виде точки на корпусе микроскопа.

При этом перефокусировку микроскопа проводить не нужно. Каждое

из положений барабана фиксируется щелчком специального пружинного фиксатора.

Сверху оптической головки установлены две окулярные трубки, в верхней части которых размещаются сменные окуляры (4), увеличение которых указано сверху.

В нашей работе используется окуляр с увеличением  $8\times$ . В зависимости от положения рукоятки общее увеличение микроскопа с этим окуляром может быть выбрано: 56, 32, 16, 8.

Фокусировка лабораторного микроскопа, т. е. перемещение оптической головки относительно объекта, производится при помощи рукоятки (5).

В верхней части основания микроскопа (6) имеется круглое окно (7), покрытое стеклом, на которое устанавливаются исследуемые объекты.

Под стеклом располагается зеркало с рукояткой вращения (8).

Для оценки линейных размеров измеряемых объектов используется специальный окуляр, внутри которого дополнительно помещены стеклянная пластинка со шкалой и диоптрийная трубка (окулярный микрометр). Он установлен в левой окулярной трубке микроскопа.

Для того чтобы добиться резкого изображения шкалы, следует, удерживая окуляр, вращать диоптрийное кольцо с насечкой.

Для определения величины линейных размеров объектов нужно знать цену деления окулярного микрометра.

Если  $l$  – длина предмета (в миллиметрах), а  $N$  – количество делений шкалы окулярного микрометра, то цену деления окулярного микрометра можно вычислить по формуле

$$\alpha\left(\frac{\text{мм}}{\text{дел}}\right) = \frac{l}{N}. \quad (16.4)$$

В качестве предмета известной длины удобнее всего использовать участок шкалы линейки с миллиметровыми делениями.

### ***Задание 1. Определение линейных размеров малых объемов с помощью микроскопа***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Ознакомьтесь с микроскопом. Определите цену деления окулярного микрометра. Для этого установите ручку (3) в положение 1 (см. рисунок 37). Затем, рассматривая участок линейки длиной  $l$ , по

шкале окулярного микрометра отсчитайте соответствующее число делений ( $N$ ).

Определите цену деления  $\alpha$  по формуле (16.4).

2. Помещая на столик микроскопа предложенные объекты, определите их линейные размеры.

3. Результаты измерений оформите в виде таблицы 22.

Таблица 22 – **Определение линейных размеров малых объемов с помощью микрометра**

Номер измерения	$N$	$l$ , мм	$\bar{l}$ , мм	$\Delta l$ , мм	$\overline{\Delta l}$ , мм	$\varepsilon$ , %
-----------------	-----	----------	----------------	-----------------	----------------------------	-------------------

4. Результат измерений представьте, используя следующую формулу:

$$l = \bar{l} \pm \overline{\Delta l}. \quad (16.5)$$

5. Сформулируйте вывод о проделанной работе.

### ***Задание 2. Определение коэффициента преломления стеклянной пластинки***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Измерьте толщину пластинки при помощи микрометра в нескольких местах. Найдите среднее арифметическое значение толщины пластинки ( $d_{cp}$ ).

2. Измерьте кажущуюся толщину стеклянной пластинки при помощи лабораторного микроскопа и определите показатель преломления.

Для этого установите исследуемую пластинку на предметном столике микроскопа. Данная пластинка имеет 2 метки в виде стрелок, нанесенные на верхней и нижней ее поверхностях под прямым углом друг к другу.

Сфокусируйте микроскоп сначала на одну стрелку, потом на другую, фиксируя каждый раз по отсчетному механизму, расположенному около ручки (5), положения объектива лабораторного микроскопа (см. рисунок 37).

Цена деления отсчетного механизма указана на корпусе микроскопа. Разность этих отсчетов, умноженная на цену деления, дает кажущуюся толщину пластинки ( $d_1$ ).

3. По формуле (16.3) определите показатель преломления пластинки.

4. Оцените погрешность определения показателя преломления. Ре-

зультат представьте, используя формулу

$$n = \bar{n} \pm \overline{\Delta n}. \quad (16.6)$$

5. Полученные результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 23.

Таблица 23 – **Определение коэффициента преломления пластинки**

Номер измерения	$d_{cp}$ , мм	$d_1$ , мм	$n$
-----------------	---------------	------------	-----

6. Сравните полученные результаты измерений с табличными (приложение Н). Сформулируйте выводы.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Как формулируются законы отражения и преломления света?
2. Что представляет собой ход лучей в плоскопараллельной пластинке, тонких собирающих и рассеивающих линзах?
3. Каковы устройство и принцип работы микроскопа?
4. Что представляет собой ход лучей в микроскопе?
5. Каков метод определения показателя преломления с помощью микроскопа?
6. Как с помощью микроскопа можно определить линейные размеры объекта?

## **Лабораторная работа 17**

### **Определение концентрации раствора спирта рефрактометром**

**Цель работы:** ознакомиться с рефрактометрическим методом анализа, приобрести навыки построения калибровочных графиков, научиться определять концентрацию жидкости в растворе.

### ***Материальное обеспечение***

1. Рефрактометр Аббе.
2. Бюретки объемом 25 мл.
3. Этиловый спирт, дистиллированная вода.

### ***Теоретические сведения***

В основе рефрактометрического метода лежит способность сред различно преломлять проходящие через них лучи света. Преломление света оценивается величиной показателя преломления ( $n$ ), постоянной для данного вещества и определяемой по формуле

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (17.1)$$

где  $\alpha$  – угол падения света на поверхность сред;  
 $\beta$  – угол преломления.

Величина показателя преломления лучей света зависит от природы вещества, его концентрации, длины волны падающего света и температуры.

Показатель преломления сам по себе, а чаще в сочетании с другими физико-химическими характеристиками (плотность, температура плавления и кипения, поверхностное натяжение) используется для анализа как чистых веществ, так и смесей.

Для исследования используются и другие рефрактометрические константы, производные от показателя преломления: удельная и молярная рефракции, удельная и относительная дисперсии, позволяющие определять размеры молекул, атомов, ионов, строение органических и неорганических веществ.

Преломление света является следствием взаимодействия его с веществом, когда под воздействием поля электромагнитных волн в атомах вещества возникают возбужденные колебания электронов и ядер, приводящие к смещению «центров тяжести» положительного и отрицательного электричества, т. е. *происходит поляризация атомов и молекул вещества*.

Различают 3 типа поляризации:

- Электронная поляризация ( $P_e$ ), обусловленная смещением электронов в молекуле или атоме.
- Атомная поляризация ( $P_a$ ), вызываемая смещением отдельных атомов и атомных групп в молекуле относительно друг друга.
- Ориентационная поляризация ( $P_{op}$ ), которая имеет место только для веществ, обладающих постоянным дипольным моментом. Молекула такого вещества под действием поля поворачивается, стремясь занять положение с наименьшей потенциальной энергией, и ориентируется в направлении поля.

Полная поляризация ( $P$ ) может быть в общем случае представлена формулой

$$P = P_e + P_a + P_{op}. \quad (17.2)$$

Согласно теории Дебая, поляризация связана с диэлектрической постоянной среды следующим образом:

$$P = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{\mu}{d}, \quad (17.3)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная;

$\mu$  – молекулярный вес;

$d$  – плотность.

В переменном электрическом поле возникает лишь поляризация электронная, которую называют *молярной рефракцией* ( $R_\mu$ ).

Так как  $\varepsilon = n_\infty^2$  ( $n_\infty$  – показатель преломления света с бесконечно большой длиной волны), то уравнение (17.3) можно записать в виде формулы Лоренца-Лоренца:

$$P_\circ = R_\mu = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{\mu}{d}. \quad (17.4)$$

Молярная рефракция не зависит от агрегатного состояния вещества и температуры. Молярная рефракция – это величина аддитивная, т. е. рефракция молекулы является суммой рефракций отдельных атомов ( $R_A$ ), связей ( $R_{св}$ ) и циклов ( $R_{цикло\psi}$ ):

$$R_\mu = \sum m R_A + \sum m R_{св} + \sum m R_{цикло\psi}, \quad (17.5)$$

где  $m$  – число атомов, связей, циклов.

На основании экспериментально определенной и вычисленной по уравнению (17.5) молярной рефракции можно установить структуру молекулы.

Рефракция, отнесенная к грамму вещества, носит название *удельной рефракции* ( $r$ ) и рассчитывается по следующей формуле:

$$r = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{d}. \quad (17.6)$$

Применение удельной рефракции особенно целесообразно при работе с растворами. Так, для бинарного раствора удельная рефракция определяется следующим образом:

$$r_{A+B} = r_A C_A + r_B (1 - C_A), \quad (17.7)$$

где  $r_{A+B}$  – удельная рефракция раствора;



$r_A$  – удельная рефракция вещества А;  
 $r_B$  – удельная рефракция вещества В;  
 $C_A$  – весовая доля вещества А в растворе.

Из уравнений (17.6) и (17.7) получают следующее соотношение:

$$\frac{n_{A+B}^2 - 1}{n_{A+B}^2 + 2} \cdot \frac{1}{d_{A+B}} = \frac{n_A^2 - 1}{n_A^2 + 2} \cdot \frac{C_A}{d_A} + \frac{n_B^2 - 1}{n_B^2 + 2} \cdot \frac{1 - C_A}{d_B}, \quad (17.8)$$

где  $n_{A+B}$  – показатель преломления раствора;  
 $n_A$  – показатель преломления вещества А;  
 $n_B$  – показатель преломления вещества В;  
 $d_{A+B}$  – плотность раствора;  
 $d_A$  и  $d_B$  – плотность веществ А и В;  
 $C_A$  – весовая доля вещества А в растворе.

По уравнению (17.8) можно вычислить удельную рефракцию растворенного вещества в жидкости, рефракцию твердых веществ и газов. Умножив удельную рефракцию на молекулярный вес, получают молекулярную рефракцию.

Количественный рефрактометрический анализ основан на зависимости показателя преломления лучей света от состава системы. Эта зависимость устанавливается экспериментально путем измерения показателя преломления для ряда эталонных систем известного состава.

На основании полученных данных строится калибровочный график в координатах «показатель преломления – состав системы». Имея такой калибровочный график, можно измерить показатель преломления системы неизвестного состава и по графику определить ее состав.

Для измерения показателя преломления лучей света применяют рефрактометры и интерферометры. Принцип действия этих приборов основан на измерении предельного (критического) угла преломления.

*Рефрактометр Аббе* служит для быстрого измерения показателей преломления жидких и твердых тел. Устройство рефрактометра Аббе основано на явлении полного внутреннего отражения.

Пусть луч света падает на границу раздела двух сред (рисунок 38) со стороны оптически более плотной среды ( $n = n_2$ ). Для углов падения ( $r$ ), меньших предельного ( $r_{np}$ ), свет частично проникает в оптически менее плотную среду ( $n = n_1$ ), а частично отражается. При  $r_{np} < r < 90^\circ$  преломленный луч отсутствует, и наступает полное отражение (рисунок 38а). В результате этого в отраженных лучах образу-

ется граница между светлой областью (полное отражение) и полутенью (частичное отражение).

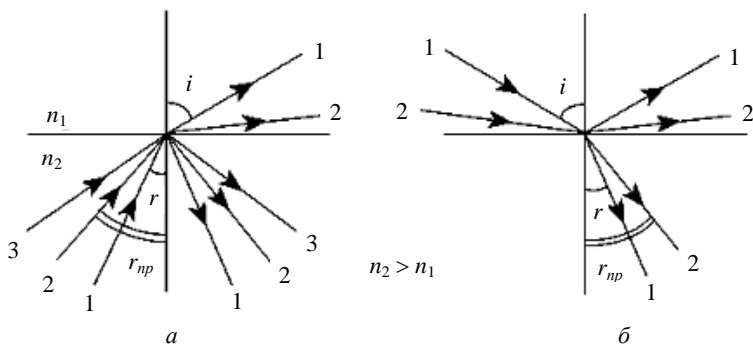


Рисунок 38 – Предельный угол полного внутреннего отражения (а) и предельный угол преломления (б)

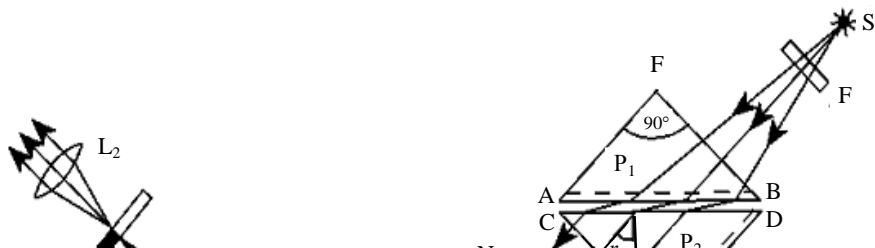
Предельный угол соответствует углу преломления ( $i = 90^\circ$ ), следовательно

$$\sin r_{np} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (17.9)$$

Зная показатель преломления одной среды и определяя на опыте предельный угол, можно с помощью формулы (17.9) определить показатель преломления второй среды.

Пусть свет падает на границу раздела со стороны оптически менее плотной среды (рисунок 38б). В зависимости от угла падения луч во второй среде может составлять с нормалью углы, расположенные в интервале от нуля до  $r_{np}$ . Предельный угол преломления соответствует углу падения (скользящий луч). В результате в преломленных лучах образуется резкая граница между светлой и темной областями. Очевидно, что величина предельного угла и в этом случае определяется по формуле (17.9).

При измерениях показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе можно пользоваться как методом полного внутреннего отражения, так и методом скользящего луча. Оптическая схема рефрактометра Аббе и ход лучей при измерении показателя преломления жидкости по методу скользящего луча показаны на рисунке 39.



**Рисунок 39 – Ход лучей в рефрактометре при измерении показателя преломления жидкости методом скользящего луча**

Основной частью рефрактометра являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами. Зазор между призмами составляет около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости.

В призму  $P_1$  свет проникает через грань ВF и попадает в жидкость через матовую грань АВ. Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами падает на грань CD призмы  $P_2$ .

Скользящему лучу в жидкости ( $i = 90^\circ$ ) соответствует предельный угол преломления. Преломленные лучи с углами больше предельного не возникают. В связи с этим угол выхода лучей из грани СЕ может изменяться лишь в некотором интервале.

Если свет, выходящий из грани СЕ, пропустить через собирающую линзу  $L_1$ , то в ее фокальной плоскости наблюдается резкая граница света и темноты. Граница рассматривается с помощью линзы  $L_2$ . Линзы  $L_1$  и  $L_2$  образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной плоскости находится изображение шкалы величин показателя преломления и указатели (нить и перекрестие).

В поле зрения окуляра  $L_2$  трубы одновременно можно увидеть только часть изображения шкалы и часть поля сфокусированных лучей, выходящих из призмы  $P_2$ . Вращая систему призм  $P_1$  и  $P_2$  и, следовательно, изменяя наклон предельного пучка лучей относительно оси зри-

тельной трубы, можно добиться, чтобы граница света и тени оказалась в поле зрения окуляра  $L_2$  и совпала с положением указателя.

При вращении системы призм поворачивается и шкала показателей преломления, установленная на пластине, жестко связанной с системой призм  $P_1$  и  $P_2$  (на рисунке 39 шкала не показана). Значение показателя преломления жидкости отсчитывается по шкале на уровне резкой границы света и тени.

Если источник света  $S$  не является монохроматическим, то наблюдаемая в окуляре трубы граница света и темноты часто оказывается размытой и окрашенной из-за дисперсии показателя преломления исследуемого вещества (т. е. из-за зависимости призмы  $N$  от длины волны). Для того чтобы получить и в этом случае резкое изображение границы, на пути лучей, выходящих из призмы  $P_2$ , помещают компенсатор с переменной дисперсией.

Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи, указанные на рисунке 40 (призмы  $N_1$  и  $N_2$  на рисунке 39), каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией.

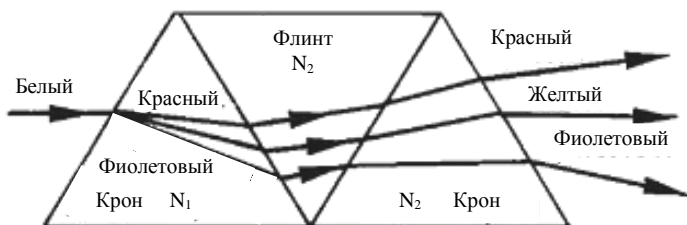


Рисунок 40 – **Ход лучей в призмах Амичи**

Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны, равной 589,3 нм (среднее значение длины волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются в ту или иную сторону (см. рисунок 40).

Если положение призм такое, как на рисунке 39, то дисперсия двух призм равна удвоенной дисперсии каждой из них. При повороте одной из призм Амичи на  $180^\circ$  относительно другой (вокруг оптической оси) полная дисперсия компенсатора оказывается равной нулю, так как дисперсия одной из призм скомпенсирована дисперсией другой.

Таким образом, в зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Для поворота призм относительно друг друга служат специальная рукоятка и система конических шестерен, с помощью которых призмы

одновременно поворачиваются в противоположных направлениях.

Вращая ручку компенсатора, следует добиваться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой и неокрашенной.

Положение границы при этом соответствует длине волны, для которой обычно и приводятся значения показателя преломления.

Прибор ИРФ-454, служащий для быстрого измерения показателей преломления жидких и твердых тел, представляет собой современную модель рефрактометра Аббе (рисунок 41). Он состоит из следующих основных частей: корпуса (1), измерительной головки (2) и зрительной трубы (3) с отсчетным устройством.

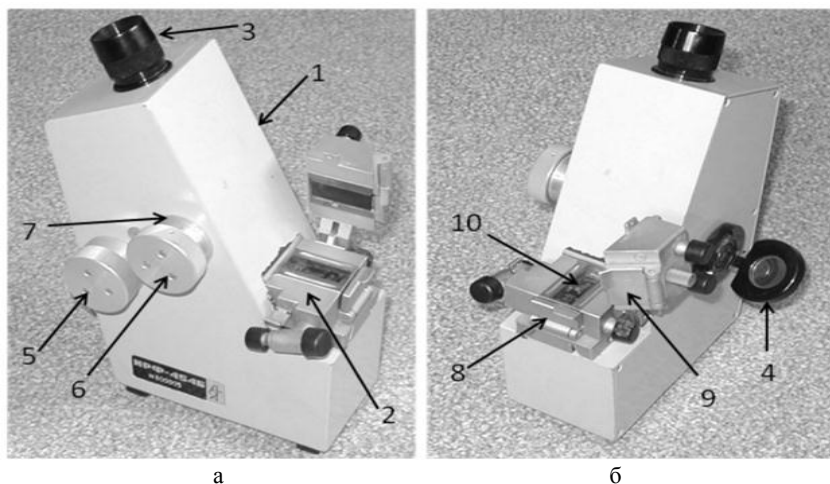


Рисунок 41 – Рефрактометр Аббе ИРФ-454

В измерительной головке находится призмный блок Аббе, который жестко связан со шкалой отсчетного устройства, расположенной внутри корпуса рефрактометра.

Шкала подсвечивается зеркалом (4) (рисунок 41б) и проектируется специальной оптической системой в поле зрения трубы. Таким образом, в поле зрения трубы одновременно видны границная линия, крест нитей, деления шкалы и визирный штрих шкалы.

Чтобы найти границу раздела и совместить ее с перекрестием, необходимо вращать маховичок (5) (рисунок 41а). Окрашенность наблюдаемой границы устраняется поворотом компенсатора с помощью маховичка (6).

Вместе с компенсатором одновременно вращается барабан (7) со шкалой, по которой в случае необходимости можно измерить дисперсию вещества.

Подсветка исследуемого вещества осуществляется с помощью зеркала (8) дневным светом или от электрической лампы накаливания.

Перед проведением эксперимента верхнюю часть измерительной головки откидывают и при дальнейшей работе измерительную головку не закрывают. Соприкасающиеся поверхности образца и измерительной призмы протирают спиртом и чистой салфеткой.

Для соблюдения оптического контакта между гранью измерительной призмы и исследуемым веществом помещают каплю жидкости, показатель преломления которой больше, чем показатель преломления измеряемого объекта. Введение между образцом и призмой параллельного слоя жидкости не оказывает влияния на ход лучей в системе. Обычно для этой цели служит монокристаллин.

Каплю жидкости помещают на полированную поверхность измерительной призмы (10) (см. рисунок 41б) при помощи стеклянной палочки с закругленным концом. При установке образца плоскость его соприкосновения с измерительной призмой должна принимать равномерную окраску. Осветительное зеркало (4) устанавливают перед окном так, чтобы поле зрения трубы было равномерно освещено.

Вращая маховичок (5), находят границу раздела света и тени, маховичком (6) устраняют ее окрашенность. Точно совмещая границу раздела с перекрестием сетки, снимают отсчет по шкале показателей преломления.

Индексом для отсчета служит неподвижный визирный штрих сетки. Целые, десятые, сотые и тысячные доли значения показателя преломления отсчитываются по шкале, десятитысячные доли оцениваются «на глаз». Шкала рефрактометра проградуирована с учетом температуры, равной 20°C. Так как показатель преломления в значительной мере зависит от температуры, в приборе предусмотрено термостатирование призмленного блока с помощью камер, через которые пропускается вода, идущая от термостата.

В учебных целях, если не требуется высокая точность при определении показателя, измерения могут проводиться без термостатирования.

По окончании измерений тщательно вытирают рабочие поверхности блока Аббе мягкой тряпочкой или фильтровальной бумагой. Полированную грань измерительной призмы надо вытирать очень осторожно, чтобы не повредить полировку. Затем призмы промывают спиртом, протирают и оставляют блок на некоторое время открытым для просушки. После этого измерительную головку осторожно закрывают.

***Задание: Определение концентрации раствора образца***

## рефрактометром

Задание выполните в следующем порядке:

1. Воспользуйтесь серией стандартных растворов этилового спирта, где объемы воды по отношению к спирту, указаны в таблице 24.

Таблица 24 – Отношение объема воды к спирту в стандартных образцах, мл

Отношение объема воды к спирту	Номер образца						
	1	2	3	4	5	6	7
H <sub>2</sub> O	9,5	9	8,5	8	7	6	5
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0,5	1	1,5	2	3	4	5

2. Вычислите концентрацию спирта ( $C$ ) в растворе в объемных процентах. Тщательно перемешайте растворы и определите показатель преломления каждого из них.

Для этого с помощью пипетки поместите 1–2 капли раствора между призмами рефрактометра, осветите призмы рефрактометра и наблюдайте в окуляр границу светотени. Поворотом призм рефрактометра подведите границу темного поля к перекрестию по шкале. Несколько сдвинув окуляр с равновесного положения, повторите определение.

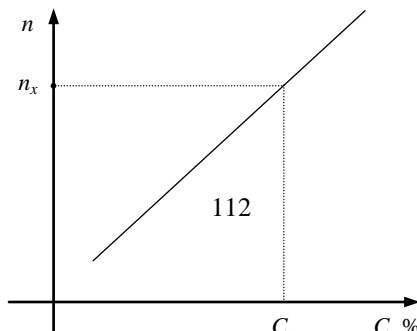
3. Удалите раствор с призм рефрактометра с помощью ватного тампона, промойте их дистиллированной водой, протрите кусочком фильтровальной бумаги. Налейте новый стандартный раствор и повторите опыт.

4. Результаты измерений оформите в виде таблицы 25.

Таблица 25 – Определение коэффициента преломления

Номер измерения	C, % от объема	n (по шкале)			Среднее значение n
		1-е	2-е	3-е	

5. По результатам анализа постройте калибровочный график (рисунк 42).



#### Рисунок 42 – Калибровочный график

6. Определите с помощью рефрактометра показатель преломления контрольного раствора спирта неизвестной концентрации (полученного у преподавателя) и по калибровочному графику определите концентрацию раствора.

7. Сформулируйте вывод по проведенным измерениям.

#### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что представляет собой явление преломления света в среде?
2. Как формулируются законы преломления?
3. Что называют относительным и абсолютным показателями преломления света?
4. Где используется явление преломления света?
5. Как определяется электронная поляризация по формуле Лоренца-Лоренца?
6. Что означает понятие «молярная рефракция»?
7. Что называют удельной рефракцией?
8. Какие различают типы поляризации?
9. Каков ход лучей в рефрактометре? (Изобразите в тетради.)
10. Какова методика измерения показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра Аббе?

#### **Лабораторная работа 18** **Изучение внешнего фотоэффекта**

***Цель работы:*** ознакомиться с явлением внешнего фотоэффекта, изучить работу фотоэлемента.

#### ***Материальное обеспечение***

1. Фотоэлемент.
2. Амперметр.
3. Вольтметр.



#### 4. Источник питания.

##### *Теоретические сведения*

Свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу: с одной стороны, он обладает волновыми свойствами, с другой стороны, представляет собой поток частиц – фотонов.

*Энергия фотона* ( $E$ ) определяется по формуле

$$E = h \cdot \nu, \quad (18.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$\nu$  – частота электромагнитного излучения.

Таким образом, энергия фотона зависит от частоты (длины волны) излучения. В пределах видимой части спектра наибольшей энергией обладают фотоны фиолетового света, наименьшей энергией – фотоны красного света.

*Фотоэлектрическим эффектом*, или просто *фотоэффектом*, называется процесс взаимодействия света с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

Для твердых и жидких тел различают внутренний и внешний фотоэффект.

*Внешним фотоэффектом* называется вырывание электронов из вещества под действием света.

При падении фотонов на поверхность тела часть фотонов отражается от нее, а часть поглощается, отдавая свою энергию атомам и электронам вещества. Если энергия фотона была достаточно велика, электрон, получивший ее, может вырваться за пределы тела.

Внешний фотоэффект ( $h\nu$ ) описывается уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (18.2)$$

где  $A$  – работа выхода электрона, т. е. работа, которую нужно совершить, чтобы вырвать электрон за пределы вещества;

$\frac{mv^2}{2}$  – кинетическая энергия вырванного электрона.

Таким образом, из уравнения (18.2) видно, что энергия фотона расходуется на выбивание электрона из вещества и сообщение ему скорости.

Внешний фотоэффект впервые был изучен русским ученым

А. Г. Столетовым в 1888 г. Им были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

- Максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности (т. е. освещенности).
- Число фотоэлектронов, вырываемых из вещества в единицу времени, пропорционально интенсивности света (т. е. световому потоку и освещенности).
- Для каждого вещества существует так называемая *красная граница фотоэффекта* – минимальная частота ( $\nu_0$ ), при которой еще возможен фотоэффект.

При  $\nu = 0$   $h\nu_0 = A$ , следовательно

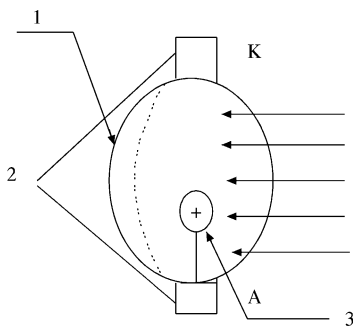
$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (18.3)$$

Величина  $\nu_0$  зависит от химической природы вещества и состояния поверхности.

Явление внешнего фотоэффекта лежит в основе работы вакуумного фотоэлемента, устройство которого представлено на рисунке 43.

Под действием света из серебра вылетают фотоэлектроны, количество которых пропорционально освещенности. Если на анод подать положительный потенциал, то возникнет упорядоченное движение электронов от катода к аноду, называемое *фототоком*.

Фототок растет с увеличением разности потенциалов между анодом и катодом и достигает насыщения, когда все электроны, выбитые из катода, достигают анода.



Условные обозначения:

1 – стеклянный баллон, из которого откачан воздух;  
 2 – катод (тонкий слой серебра, нанесенный на внутреннюю стенку  
 стеклянного баллона); 3 – анод (металлический шарик или кольцо).

Рисунок 43 – Устройство вакуумного фотоэлемента

Вакуумный фотоэлемент обладает рядом основных характеристик, к которым относятся следующие:

- *Интегральная чувствительность* ( $\gamma$ ), равная силе фототока ( $I_\phi$ ), возникающего при падении на катод светового потока ( $\Phi$ ) в 1 люмен:

$$\gamma = \frac{I_\phi}{\Phi} \left( \frac{\text{мЛН}}{\text{лМ}} \right). \quad (18.4)$$

- *Удельная чувствительность* ( $\gamma_1$ ), равная отношению интегральной чувствительности фотоэлемента к разности потенциалов анода и катода:

$$\gamma_1 = \frac{\gamma}{U_{AK}}. \quad (18.5)$$

- *Вольт-амперная характеристика*, т. е. зависимость фототока от напряжения между анодом и катодом:

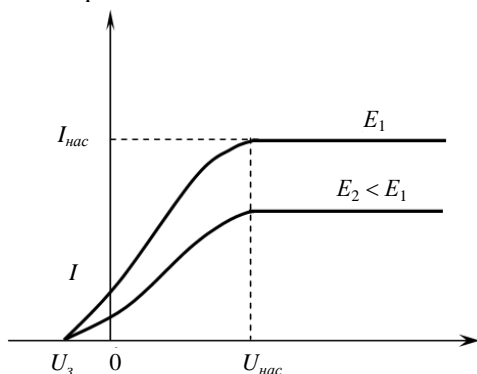
$$I_\phi = f(U) \text{ (при } E = \text{const)}. \quad (18.6)$$

- *Световая характеристика* – зависимость фототока от освещенности ( $E$ ):

$$I_\phi = f(E) \text{ (при } U = \text{const)}. \quad (18.7)$$

Остановимся подробнее на вольт-амперной характеристике вакуумного элемента.

Законы внешнего фотоэффекта можно проверить, анализируя зависимость фототока от напряжения (рисунок 44) между катодом и анодом вакуумного фотоэлемента.



При отсутствии напряжения между электродами освещенного фотоэлемента часть электронов, имеющих кинетическую энергию ( $W_k$ ), достигает анода, создавая ток ( $I_0$ ).

Увеличение фототока ( $I_\phi > I_0$ ) обеспечивается за счет энергии внешнего электрического поля ( $U > 0$ ).

При подаче положительного потенциала внешнего электрического поля на анод и отрицательного потенциала на катод все вылетевшие из катода электроны достигают анода, создавая фототок насыщения ( $I_{нас}$ ). Напряжение, при котором достигается этот ток, называется напряжением насыщения ( $U_{нас}$ ).

При прочих равных условиях величина фототока насыщения зависит от энергетической освещенности катода, которую можно изменять, варьируя расстояние от источника света до катода.

Сила фототока уменьшается до нуля, если подать положительный потенциал внешнего электрического поля на катод и отрицательный – на анод. Напряжение, при котором задерживаются даже самые «быстрые» фотоэлектроны, называется напряжением запирающего.

За счет работы кулоновских сил, направленных противоположно скорости движения фотоэлектронов, кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается до нуля ( $\Delta W_k = 0$ ). Это можно выразить следующим образом:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = |e| \cdot U, \quad (18.8)$$

где  $|e|$  – заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

При изучении световой характеристики вакуумного элемента следует отметить, что процессы поглощения квантов света электронами происходят независимо друг от друга, поэтому число фотоэлектронов, покидающих поверхность металла, прямо пропорционально числу падающих квантов света, т. е. интенсивности светового потока.

Ток насыщения определяется числом фотоэлектронов, следовательно, фотоэлектрический ток насыщения прямо пропорционален падающему лучистому потоку и определяется по формуле

$$I_{нас} = \gamma \Phi. \quad (18.9)$$

Зависимость фототока насыщения от светового потока носит

название световой характеристики фотоэлемента (рисунок 45).

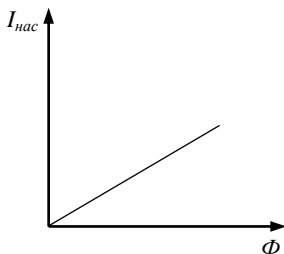


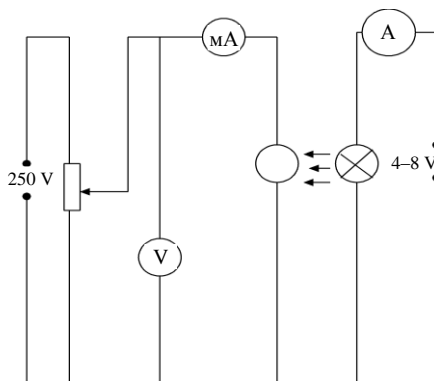
Рисунок 45 – Световая характеристика фотоэлемента

Коэффициент в формуле (18.9) называется интегральной чувствительностью фотоэлемента. Она равна силе тока насыщения в расчете на единицу светового потока и измеряется в миллиамперах на люмен (мкА/лм).

**Задание 1. Снятие вольт-амперной характеристики вакуумного элемента**

Задание выполните в следующем порядке:

1. Соберите предложенную электрическую схему (рисунок 46).



**Рисунок 46 – Схема для измерения вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента**

2. Включите источник света. Изменяя напряжение между анодом и катодом фотоэлемента и оставляя неизменной его освещенность (т. е. расстояние от фотоэлемента до лампочки), измерьте значение силы фототока.

Повторите этот опыт 2 для различных освещенностей (различных расстояний между фотоэлементом и источником света).

3. Постройте вольт-амперные характеристики для различных освещенностей, используя формулу (18.6).

4. При расчетах силу света (измеряется в канделах) принимайте численно равной мощности лампочки:

$$I = I_{\text{л}} \cdot U_{\text{л}}, \quad (18.10)$$

где  $U_{\text{л}}$  – напряжение на лампочке;

$I_{\text{л}}$  – ток лампочки.

5. Освещенность рассчитайте по следующей формуле:

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (18.11)$$

где  $r^2$  – расстояние между фотоэлементом и источником света.

6. Результаты работы оформите в виде таблицы 26.

**Таблица 26 – Результаты вольт-амперной характеристики фотоэлемента**

$r_1 = \text{const}$		$r_2 = \text{const}$	
$U, \text{В}$	$I_{\phi}, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$I_{\phi}, \text{мА}$

***Задание 2. Снятие световой характеристики фотоэлемента***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Снимите значение фототока при постоянном значении напряжения для различных освещенностей (т. е. для различных расстояний от фотоэлемента до источника света).

2. Результаты измерений представьте в виде таблицы 27.

**Таблица 27 – Результаты световой характеристики фотоэлемента**

$U_1 = \text{const}$	$U_2 = \text{const}$	$U_3 = \text{const}$
----------------------	----------------------	----------------------

$r, \text{ м}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$r, \text{ м}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$	$r, \text{ м}$	$I_{\phi}, \text{ мА}$
----------------	------------------------	----------------	------------------------	----------------	------------------------

3. Постройте семейство зависимости силы фототока от освещенности при  $U = \text{const}$  (формула 18.7).

4. Сформулируйте выводы.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называется световым потоком? В каких единицах он измеряется?

2. Что означает понятие «сила света»? В каких единицах она измеряется?

3. Что означает понятие «освещенность»? В каких единицах она измеряется?

4. В чем заключается сущность внешнего фотоэффекта?

5. Что называют красной границей фотоэффекта? (Выведите ее формулу из уравнения Эйнштейна.)

6. Как формулируются законы фотоэффекта?

7. Каков принцип вакуумной работы фотоэлемента?

8. Что называют фототоком?

9. Что вызывает явление насыщения фототока?

10. При какой длине волны света, освещающего металл, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов будет равна 1,3 эВ, если красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна  $1,2 \cdot 10^{15}$  Гц,  $1,6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ ?

11. Каковы основные характеристики вакуумного фотоэлемента?

# ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

## Лабораторная работа 19

### Измерение мощности полевой эквивалентной дозы гамма-излучения

**Цель работы:** изучить принцип, устройство и технические характеристики прибора РКС-107, провести измерения радиационного фона помещения с помощью прибора.

#### *Материальное обеспечение*

Прибор РКС-107.

#### *Теоретические сведения*

При взаимодействии электронов, протонов, нейтронов с веществом образуются ионы и заряженные частицы. Так, например, при взаимодействии  $\gamma$ -излучения с веществом в результате фотоэффекта, комптон-эффекта атом ионизируется, а в следствие рождения электронно-позитронной пары в поле ядра образуются две заряженные частицы. Нейтрон, взаимодействуя с ядром, часто вызывает появление  $\gamma$ -кванта, который в свою очередь, вызывает появление электронов, позитронов и ионов. Таким образом, количественная оценка взаимодействия излучения с веществом может быть основана на измерении заряда, создаваемого продуктами ионизации.

Второй способ оценки воздействия излучения на вещество состоит в том, чтобы определить количество энергии, выделяемой в среде частицами, возникающими в результате ионизации, столкновений и рассеяния. Эти способы и лежат в основе единиц измерения влияния излучения на среды. При этом используется такое понятие, как доза.

*Экспозиционная доза* ( $X$ ) – это характеристика фотонного излучения, которая основана на ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе. Определяется она как отношение суммарного заряда ( $dQ$ ) всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (19.1)$$



Единицей экспозиционной дозы в СИ является 1 кулон на килограмм (Кл/кг).

Очень часто пользуются внесистемной единицей измерения – рентгеном (Р). Соотношения между единицами будет следующее:  $1\text{Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

При вычислении действия радиации на какую-нибудь среду (особенно при облучении живого организма) необходимо учитывать не только общую дозу, но и время, за которое она была получена. Поэтому было введено понятие мощности экспозиционной дозы.

*Мощность экспозиционной дозы* – это отношение изменения экспозиционной дозы ( $dX$ ) к промежутку времени ( $dt$ ), в течении которого это изменение произошло:

$$X = \frac{dX}{dt}. \quad (19.2)$$

Единицами ее измерения в СИ является  $1\text{Кл/кг}\cdot\text{с} = 1\text{А/кг}$ , а внесистемные единицы – рентген в час (Р/ч), рентген в минуту (Р/мин), рентген в секунду (Р/с).

Мощность экспозиционной дозы характеризует радиационную обстановку независимо от свойств облучаемых объектов.

Более точными характеристиками влияния излучения на различные среды принято считать величины, связанные с измерениями энергии, которая выделяется ионизирующими частицами в веществе.

Основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

*Поглощенная доза ионизирующего излучения ( $D$ )* – это отношение средней энергии ( $dE$ ), переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме массы  $dm$ , к массе вещества этого объема:

$$D = \frac{dE}{dm}. \quad (19.3)$$

Единица измерения поглощенной дозы в СИ – грей (Гр). Один Грей равен поглощенной дозе, при которой веществу массой 1 кг передается энергия 1 Дж, т. е.  $1\text{Гр} = 1\text{Дж/кг}$ .

Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад ( $1\text{рад} = 0,01\text{Гр}$ ).

Аналогично понятию мощности экспозиционной дозы можно ввести понятие «мощность поглощенной дозы», рассчитываемая по формуле

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}. \quad (19.4)$$

Единицей измерения мощности поглощенной дозы в системе измерения являются 1Гр/с, 1 Вт/кг.

Для оценки биологического эффекта воздействия излучения произвольного состава потребовалось введение новой характеристики – эквивалентной дозы ионизирующего излучения.

*Эквивалентная доза ионизирующего излучения (H)* – это произведение поглощенной дозы (*D*) на взвешивающий коэффициент для разных видов энергий радиоактивных излучений (*W<sub>R</sub>*) в данном объеме биологической ткани:

$$H = W_R \cdot D. \quad (19.5)$$

Здесь для сравнения биологических эффектов, производимых одинаковой поглощенной дозой, но различными видами излучений, введен коэффициент качества, который количественно определяет относительную биологическую эффективность.

Под *относительной биологической эффективностью* понимают отношение поглощенной дозы рентгеновского излучения, которая принята за эталон и которая вызывает определенный биологический эффект, к поглощенной дозе данного вида излучения, вызывающего тот же биологический эффект.

*Коэффициент качества, или взвешивающий коэффициент*, – это некоторое заданное для каждого вида излучения значение относительной биологической эффективности. Некоторые значения этого коэффициента качества приведены в таблице 28.

Таблица 28 – **Взвешивающий коэффициент для разных видов радиоактивных излучений**

Вид излучения	$W_R$
γ-излучение	1
β-излучение	1
α-излучение	20
Тяжелые ядра отдачи	20
Нейтроны с энергией 1 кэВ	3
Нейтроны с энергией 10 МэВ	10
Протоны с энергией 2 МэВ	5

Единицей измерения эквивалентной дозы в СИ является зиверт (Зв). Один зиверт – это произведение среднего коэффициента качества ( $W_R = 1$ ) на поглощенную дозу ( $D = 1\text{Гр}$ ).

Распространенной внесистемной единицей является 1 бэр – биологический эквивалент рада (1 бэр = 0,01 Зв).

Приборы, предназначенные для измерения дозовых величин (экспозиционной, поглощенной или эквивалентной дозы или их мощности), называют *дозиметрами*.

Рассмотрим назначение, технические характеристики и устройство прибора РКС-107.

РКС-107 – это комбинированный прибор, выполняющий функции дозиметра и радиометра. Он предназначен для индивидуального контроля радиационной обстановки на местности, в жилых и рабочих помещениях.

Прибор обеспечивает возможность следующих измерений:

- мощности полевой эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения (мкЗв/ч);
- плотности потока  $\beta$ -излучения с поверхности, загрязненной радионуклидами стронция-90 и иттрия-90;
- удельной (объемной) активности радионуклида цезия-137 в водных растворах (Бк/г).

Кроме того, в приборе предусмотрена звуковая индикация превышения пороговых значений мощности полевой эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения от 0,6 мкЗв/ч и выше (до 1,2 мкЗв/ч).

Прибор РКС-107 представляет собой носимую конструкцию (рисунок 47), состоящую из корпуса (1) и крышки (3), скрепленных между собой. К крышке на основании прибора крепятся 2 съемные крышки: крышка отсека питания (6) и крышка-фильтр (5).

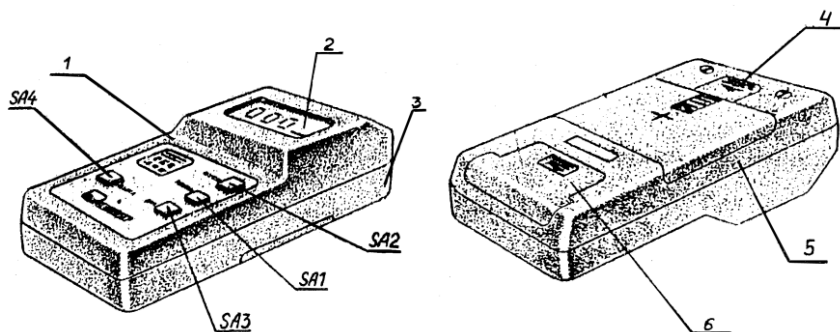


Рисунок 47 – Общий вид прибора РКС-107

В корпусе смонтированы все элементы электрической схемы прибора: 2 газоразрядных счетчика СБМ-20, устройство управления, счетчик импульсов, преобразователь напряжения, табло жидкокристаллического индикатора, делитель частоты, таймер, устройство звуковой сигнализации.

На лицевой панели прибора расположены табло жидкокристаллического индикатора (2) и 4 кнопки, предназначенные для включения прибора (*Вкл*), выбора режима его работы (*Режим*), пуска счетной схемы (*Пуск*) и выключения (*Выкл*).

На тыльной стороне прибора, в верхней части, имеется окно, закрытое крышкой (4), в которое выведен разъем для возможного подключения внешнего блока детектирования (в комплект прибора не входит).

В средней части крышки (3) находится крышка-фильтр (5). Если крышка-фильтр установлена, то прибор регистрирует только фоновое  $\gamma$ -излучение. При работе прибора в режимах радиометра и при измерении плотности потока  $\beta$ -излучения и удельной активности эта крышка снимается и счетчики излучений оказываются закрытыми только пленочными фильтрами.

Требуемый режим измерения выбирается нажатием кнопки *Режим*. При этом на табло индикатора указатель режима работы (символ «черная полоса») перемещается на единицу измерения определяемой величины.

Аккумуляторная батарея устанавливается в нижний отсек (3), закрываемый съемном крышкой (6), и подключается к контактам печатной платы. До начала эксплуатации батарея должна быть заряжена с помощью зарядного устройства, входящего в комплект прибора.

Прибор обеспечивает индикацию превышения значения мощности полевой эквивалентной дозы величин, равных 0,6 и 1,2 мкЗв/ч. Включение и выключение порогового устройства производится повторным нажатием кнопки *Вкл* и сопровождается высвечиванием на табло индикатора символа «~».

На крышке-фильтре нанесены знаки.

Знак « $\nabla$ » показывает направление перемещения запирающей защелки при снятии крышки фильтра.

Знак «+» указывает центр плоскости расположения детекторов излучения; от него рассчитываются расстояния до образцовых и контрольных  $\gamma$ -источников при градуировке и поверке прибора.

На крышке отсека питания расположена стрелка, указывающая направление перемещения этой крышки при ее снятии.

Рассмотрим принцип работы прибора РКС-107.

В приборе применен ионизационный метод регистрации излучений, при котором используется эффект ионизации газовой среды, вызываемый воздействием на нее ионизирующего излучения. Для преобразования энергии ионизирующих излучений в энергию электрического тока используются газоразрядные счетчики.

При прохождении ионизирующей частицы через газовую среду образуются ионы, которые собираются на электродах счетчика. Положительные ионы движутся к катоду, а отрицательные – к аноду. В электрической цепи прибора начинает проходить ток, который регистрируется измерительным устройством. По его значению можно судить об интенсивности излучения или отсчитывать число зарегистрированных частиц по появляющимся импульсам, т. е. при попадании в рабочие объемы газоразрядных счетчиков  $\gamma$ -квантов и  $\beta$ -частиц на нагрузках счетчиков появляются импульсы, частота следования которых пропорциональна измеряемой величине. Импульсы, появившиеся в счетчике, поступают в устройство управления, где преобразуются в импульсы стандартной амплитуды и передаются на счетчик импульсов. Он подсчитывает импульсы, и на табло высвечиваются результаты измерений.

После прекращения воздействия ионизирующих излучений на счетчик ток в цепи исчезает, так как газ внутри счетчика является изолятором.

***Задание: Измерение мощности полевой эквивалентной дозы гамма-излучения с помощью прибора РКС-107***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Включите прибор, нажав кнопку *Вкл.* При каждом включении прибора раздается кратковременный звуковой сигнал, а на табло появляется информация в соответствии с рисунком 48. Указатель режима работы прибора при включении устанавливается в положение «МКЗв/ч».

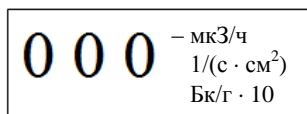


Рисунок 48 – Включение прибора

2. Нажмите кнопку *Пуск*. При каждом нажатии кнопки также раздается кратковременный звуковой сигнал, а на табло жидкокристаллического индикатора появляется точка (рисунок 49). Указатель режима работы начнет пульсировать, а прибор начнет регистрировать измеряемую величину, в данном случае величину мощности полевой эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения в микрозивертах в час.

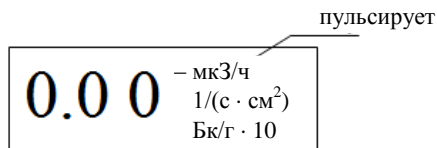


Рисунок 49 – Прибор в режиме работы

В конце цикла измерения (через  $53 \pm 1,2$  с) вновь раздается кратковременный звуковой сигнал. Указатель режима прекратит пульсировать, а на табло отобразится результат измерения (на примере, приведенном на рисунке 50, он равен 0,12 мкЗв/ч).

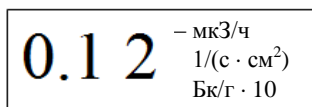


Рисунок 50 – Показания прибора

3. Для исследования радиационного фона помещения радионуклидами выберите на исследуемой поверхности 7–10 контрольных точек для измерений.

4. При малых значениях мощности полевой эквивалентной дозы для получения более точного результата измерения снимите 10 отсчетов показаний прибора потока фоновое  $\gamma$ -излучения ( $\Phi_\gamma$ ), запишите их и за измеренное значение примите их среднее арифметическое. При этом выключать и повторно включать прибор нет необходимости. После индикации результата измерения одного отсчета вновь нажмите кнопку *Пуск* и дождитесь повторного результата измерения.

5. Для каждой контрольной точки рассчитайте среднее значение ( $\overline{\Phi}_\gamma$ ) и абсолютную погрешность величины фоновое  $\gamma$ -излучения ( $\Delta\Phi_\gamma$ ).

6. Изобразите карту помещения с указанием средних значений и абсолютных погрешностей радиационного фона.

7. С помощью средних значений радиационного фона в контрольных точках рассчитайте среднее значение мощности дозы  $\gamma$ -излучения для помещения.

8. Определите максимальную дозу  $\gamma$ -излучения, которую может получить человек за год, находясь в данных радиационных условиях. Сравните ее с максимально допустимой за год. Следует помнить, что с учетом естественных факторов облучения средняя эквивалентная доза не должна превышать 5 мЗв в год.

9. Сформулируйте выводы на основе результатов измерений и расчетов.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие основные дозиметрические единицы применяются?
2. Что называют относительной биологической эффективностью?
3. Что понимают под взвешивающим коэффициентом для разных видов радиоактивных излучений?
4. Каково соотношение между дозиметрическими единицами?
5. Каковы назначение и технические возможности прибора РКС-107?
6. В чем заключается принцип работы прибора РКС-107?

### ***Лабораторная работа 20***

#### ***Измерение удельной активности радионуклида цезия-137 в водном растворе дозиметром-радиометром РКС-107***

**Цель работы:** получить практические навыки проведения измерений по определению содержания радионуклидов в объектах природной среды и пробах, измерить удельную активность радионуклида цезия-137 в исследуемом водном растворе.

### ***Материальное обеспечение***

1. Прибор РКС-107.
2. Набор проб продукции и материалов.

### ***Теоретические сведения***

**Активность** – это мера радиоактивности какого-либо количества радионуклидов, характеризуемая числом радиоактивных распадов, происходящих в источнике за единицу времени.

Единицей активности в системе измерения является беккерель (Бк), соответствующий одному распаду за секунду. Внесистемная единица активности – кюри (Ки). Соотношение единиц будет следующим:  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ;  $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ .

Активность, приходящаяся на единицу массы вещества, называется *удельной активностью* и измеряется в беккерелях на килограмм (Бк/кг). Активность, приходящаяся на единицу объема вещества, называется *объемной активностью* и измеряется в беккерелях на литр или метр кубический (Бк/л, Бк/м<sup>3</sup>).

Возникающие в процессе радиоактивного распада излучения, проходя через вещество, взаимодействуют с атомами и молекулами среды вещества, передавая им свою энергию.

Для измерения энергии (интенсивности) воздействия ионизирующего излучения, степени ионизации, чувствительности тканей к данному виду излучения вводят понятие дозы. Доза – это количество энергии излучения, передаваемое веществу.

Для характеристики доз поглощения по эффекту, вызываемому в воздухе, используется экспозиционная доза. Понятие экспозиционной дозы было введено для гамма- и рентгеновского излучений, которые обладают большой проникающей способностью и достаточно равномерно распределяются в пространстве.

*Экспозиционная доза ( $D_{\text{эк}}$ )* – это доза гамма- или рентгеновского излучения, при поглощении которого в воздухе создается определенное количество пар ионов.

В системе измерения единицей экспозиционной дозы является доза квантового излучения, при воздействии которого в 1 кг воздуха возникает суммарный заряд ионов одного знака, равный 1 Кл (Кл/кг). Внесистемной единицей экспозиционной дозы является рентген (Р). Соотношение единиц будет следующее:  $1 \text{ Кл/кг} = 2,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$ ;  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^3 \text{ Кл/кг}$ .

Степень радиоактивного загрязнения местности характеризуется мощностью экспозиционной дозы.

*Мощность экспозиционной дозы* – это электрический заряд одного знака, образованный под действием  $\gamma$ -излучения в одной единице массы сухого вещества воздуха (экспозиционная доза) в единицу времени.

Единицей измерения мощности экспозиционной дозы в системе измерения является ампер на килограмм (А/кг), внесистемная единица – рентген в секунду (Р/с).

Экспозиционная доза, измеренная на высоте 1 м от поверхности



земли и отнесенная к промежутку времени, выраженному в часах, называется *уровнем радиации* (Р/ч).

Экспозиционная доза характеризует радиационную обстановку в окружающей среде (воздухе), ее потенциальную опасность независимо от свойств облучаемых объектов. Вместе с тем воздействие на объект оказывает только та часть энергии излучения, которая поглощается им. Биологический эффект в облучаемом объекте под воздействием ионизирующих излучений зависит от величины поглощенной энергии. Для характеристики энергии ионизирующего излучения, поглощенной конкретным объектом, используется понятие поглощенной дозы.

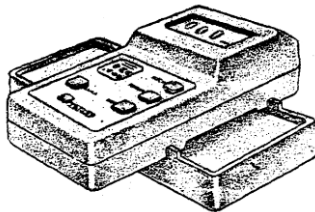
Для Республики Беларусь естественный уровень радиации (гамма-фон) находится в пределах 20 мкР/ч. В настоящее время измерения проводятся в зивертах. Перевод рентгенов в зиверты производится через внесистемные единицы при взвешивающем коэффициенте, равном единице (для гамма-излучений). На основании утверждения, что для биоткани экспозиционная доза близка к поглощенной, можно произвести пересчет размерностей измерений:  $20 \text{ мкР/ч} \approx 20 \text{ мкрад/ч} = 20 \text{ мкбэр/ч} = 0,20 \text{ мкЗв/ч}$ .

Для измерения удельной активности радионуклидов применяется прибор РКС-107, назначение, технические характеристики, устройство и принцип работы которого подробно описаны в лабораторной работе 19.

***Задание: Измерение удельной (объемной) активности радионуклида цезия-137 в водных растворах***

Задание выполните в следующем порядке:

1. Снимите заднюю крышку-фильтр прибора РКС-107.
2. Заполните измерительную кювету заведомо чистой в радиационном отношении водой до метки – буртика внутри кюветы. Установите прибор на кювету, как это показано на рисунок 51.



**Рисунок 51 – Измерение удельной (объемной) активности радионуклида цезия-137 в водных растворах**

3. Включите прибор кнопкой *Вкл.* Нажимая дважды кнопку *Режим*, установите указатель режима работы прибора в положение «Бк/г · 10» (рисунок 52).

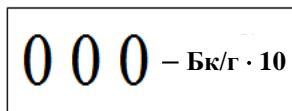


Рисунок 52 – Прибор РКС-107 в режиме работы «Бк/г · 10»

4. Нажмите кнопку *Пуск*. После звукового сигнала окончания цикла измерения (через  $240 \pm 6,0$  с) снимите отсчет фонового показания прибора. На примере, показанном на рисунке 53, он равен 0,51 Бк/г · 10. Запишите показания прибора.

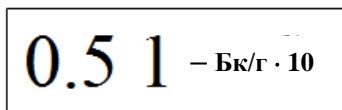


Рисунок 53 – Пример фонового показания прибора

Повторите измерения не менее 5 раз, найдите среднее арифметическое значение показаний, умножьте результат на 10. Получив результат измерения фоновых показаний ( $A_{\phi}$ ) в беккерелях на грамм, запишите его. Выключите прибор и снимите его с кюветы.

5. Вылейте воду из кюветы, просушите ее и заполните исследуемым водным раствором до той же метки.

6. Вновь установите прибор на кювету, включите прибор кнопкой *Вкл.* Нажимая дважды кнопку *Режим*, установите указатель режима работы прибора в положение «Бк/г · 10». Нажмите кнопку *Пуск*. После звукового сигнала окончания цикла измерения (через  $240 \pm 6,0$  с) по нажатию кнопки снимите отсчет показания удельной (объемной) активности прибора. На примере, показанном на рисунке 54, удельная активность равна 0,94 Бк/г · 10. Запишите показания прибора.

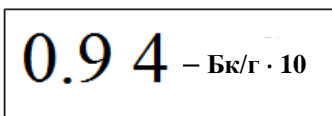


Рисунок 54 – Прибор показания удельной активности прибора

При малых значениях удельной активности радионуклида цезия-137 рекомендуется снимать не менее 5 отсчетов показаний, находить их среднее арифметическое показание и умножать его на 10.

7. Рассчитайте величину удельной (объемной) активности радионуклида в водном растворе ( $A_u$ ) в беккерелях на грамм:

$$A_u = (A_u + A_\phi) - A_\phi. \quad (20.1)$$

На примерах, показанных на рисунках 53 и 54, измеренное значение активности равно:

- в беккерелях на грамм:  $A_u = 9,4 - 5,1 = 4,3$  Бк/г;
- в беккерелях на килограмм (результат надо умножить на 1 000):  $A_u = 4,3 \cdot 1\,000 = 4\,300$  Бк/кг;
- в кюри на килограмм (результат измерения необходимо умножить на  $2,7 \cdot 10^{-11}$ ):  $A_u = 4\,300 \cdot 2,7 \cdot 10^{-11} = 1,61 \cdot 10^{-11}$  Ки/кг.

8. Вылейте анализируемый водный раствор, просушите кювету. При необходимости произведите дезактивацию кюветы с применением синтетических моющих средств.

9. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы 29. Сформулируйте выводы.

Таблица 29 – Результаты измерений удельной (объемной) активности радионуклида цезия-137 в исследуемом образце, Бк/г · 10

Номер показания	Исследуемый образец	$A_\phi$	$A_u + A_\phi$	$A_u$
1. ... и т. д.				
Среднее значение				

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называют активностью?
2. Что понимают под экспозиционной, поглощенной и эквивалентной дозами? В каких единицах они измеряются?
3. Для чего предназначен прибор РКС-107?
4. Каковы устройство и принцип работы прибора РКС-107?
5. Каков порядок измерения удельной активности цезия-137 в водных растворах?
6. Как осуществить перевод показания прибора 4,3 Бк/г в микрозиверты в час?

## ***СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ***

**Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 384 с.

**Грабовский, Р. И.** Курс физики : курс лекций / Р. И. Грабовский. – М. : Высш. шк., 1998. – 608 с.

**Малевич, М. А.** Лабораторный практикум по физическим основам товароведения : учеб. пособие / М. А. Малевич. – Минск : БГЭУ, 1999.

**Малевич, М. А.** Физические основы товароведения : учеб. пособие / М. А. Малевич. – Минск : БГЭУ, 1996.

**Савельев, И. В.** Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. – М. : Высш. шк., 1973.

**Трофимова, Т. И.** Краткий курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 2000. – 352 с.

**Физические основы сырья и товаров : практикум / авт.-сост. : И. О. Деликатная, В. В. Андреев, Г. С. Митюрин.** – Гомель : Бел. торгово-экон. ун-т потребит. кооп., 2006. – 76 с.

**Чертов, А. Г.** Единицы физических величин : пособие / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1977. – 287 с.

**Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1968. – 940 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

#### Основные физические и математические постоянные

Название константы	Обозначение	Значение	Единица измерения
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$	м/с
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23}$	моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	$R$	8,31	Дж/моль·К
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Элементарный заряд	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1 \cdot 10^{-31}$	кг
Удельный заряд электрона	$e/m_e$	$1,76 \cdot 10^{11}$	Кл/кг
Масса покоя протона	$m_p$	1,007	а.е.м.
Масса покоя нейтрона	$m_n$	1,009	а.е.м.
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,84 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$12,57 \cdot 10^{-7}$	Г/м
Постоянная Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная Планка	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34}$	Дж·с
Число «пи»	$\pi$	$\approx 3,14$	–
Основание натуральных логарифмов	$exp$	$\approx 2,718$	–
Связь десятичного и натурального логарифмов	$\ln a$	$2,31 \lg a$	–
Ускорение свободного падения	$g$	$\approx 9,81$	м/с <sup>2</sup>

**Внесистемные единицы, допущенные к применению наравне с единицами международной системы измерения**

Величина	Наименование	Единица измерения	Соотношение с единицей СИ
Масса	Тонна	т	$10^3$ кг
	Атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Объем, вместимость	Литр	л	$10^{-3}$ м <sup>3</sup>
Плоский угол	Градус	...°	$1,74 \cdot 10^{-2}$ рад
	Минута	...'	$2,91 \cdot 10^{-2}$ рад
	Секунда	..."	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
Относительная величина	Единица (число 1)	—	1
	Процент	%	$10^{-2}$
Логарифмическая величина	Бел	Б	—
	Децибел	дБ	—
Температура	Градус Цельсия	°С	$1^\circ\text{C} = 1\text{K}$
Давление	Миллиметров ртутного столба	мм рт. ст.	133,3 Па
	Атмосфера	атм	$1,013 \cdot 10^5$ Па
Работа, энергия	Электрон-вольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Примечание — 1 мм рт. ст. = 0,01316 атм; 1 атм = 760 мм рт. ст.			

**Приставки для образования наименований  
кратных и дольных единиц физических величин**

Кратность и дольность	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
$10^{18}$	экса	Э	E
$10^{15}$	пета	П	P
$10^{12}$	тера	Т	T
$10^9$	гига	Г	G
$10^6$	мега	М	M
$10^3$	кило	к	k
$10^2$	гекто	г	h
$10^1$	дека	да	da
$10^{-1}$	деци	д	d
$10^{-2}$	санти	с	c
$10^{-3}$	милли	м	m
$10^{-6}$	микро	мк	μ
$10^{-9}$	нано	н	n
$10^{-12}$	пико	п	p
$10^{-15}$	фемто	ф	f
$10^{-18}$	атто	а	a

*Свойства степеней*

- $(10^a)^b = 10^{ab}$ ;
- $10^a : 10^b = 10^{a-b}$ ;
- $10^a \cdot 10^b = 10^{a+b}$ ;
- $\sqrt[b]{10^a} = 10^{\frac{a}{b}}$ .

**Модуль продольной упругости (модуль Юнга)  
различных материалов**

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Материал	Модуль Юнга, ГПа
Алюминий	63–70	Резина мягкая вулканизированная	0,0015–0,005
Бетон	15–40	Серебро	82,7
Каучук	0,008	Стекло	49–78
Латунь: корабельная катаная	98	Сталь: легированная	206
холоднотянутая	89–97	углеродистая	195–205
Медь: литье	82	Чугун: белый	113–116
катаная	108	серый	113–116
холоднотянутая	127	ковкий	150
Никель	204	Целлулоид	1,7–1,9
Плексиглас	5,25	Стальное литье	170

**Скорость звука (при температуре 293 К)**

Газы	Значение скорости звука (м/с)
Азот	333,6
Аммиак	415,0
Водород	1286,0
Воздух (сухой)	331,0
Гелий	970,0
Кислород	314,0
Углекислый газ	260,3
Хлор	206,0
Этилен	317,0



### Удельная теплоемкость газов

Газ	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	
	$C_p$	$C_v$
Азот	1 040	741
Водород	1 409	1 000
Водяной пар	1 820	1 380
Воздух	1 020	728
Гелий	2 080	1 250
Кислород	912	649
Углекислый газ	847	653

### Динамическая вязкость жидкостей (при температуре 290 К)

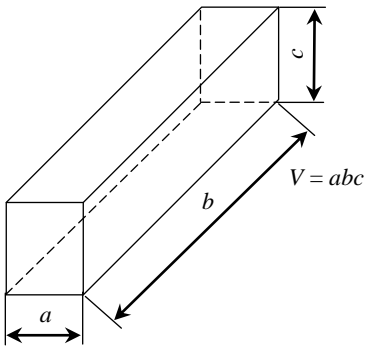
Жидкость	$\eta, 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}$	Жидкость	$\eta, 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}$
Ацетон	0,0337	Ртуть	0,159
Бензол	0,0673	Сероуглерод	0,0382
Бром	0,102	Спирт этиловый	0,122
Вода	0,105	Толуол	0,0613
Глицерин	139,3	Уксусная кислота	0,127
Касторовое масло	120,0	Хлороформ	0,0579
Масло машинное: легкое	11,3	Масло цилиндровое: очищенное (313 К)	0,109
тяжелое	66,0	темное	24

**Коэффициент поверхностного натяжения  
некоторых жидкостей на границе с воздухом**

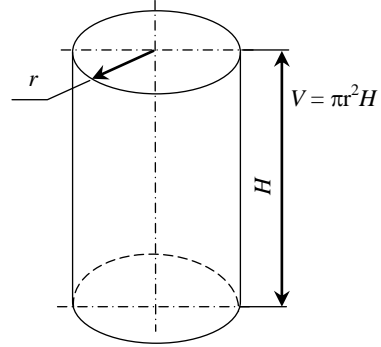
Жидкость	Температура, °С	$\sigma$ , $10^{-3}$ Н/м
Ацетон	20	23,70
Белок куриного яйца	20	52,70
Бензол	20	28,90
Вода	0	75,70
Вода	20	72,80
Вода	30	71,15
Вода	50	67,90
Вода	100	58,84
Глицерин	20	63,40
Керосин	0	29,00
Керосин	20	24,00
Кровь	37	45,40
Мыльный раствор	20	40,00
Масло вазелиновое	20	31,80
Масло касторовое	20	36,40
Нефть	20	30,00
Раствор сахара 5%-ный	20	74,00
Раствор сахара 10%-ный	20	74,50
Раствор сахара 20%-ный	20	76,50
Раствор сахара 63%-ный	20	79,60
Ртуть	20	472,00
Спирт метиловый	20	22,60
Хлороформ	20	27,10
Эфир этиловый	20	17,00

## Определение объема геометрических фигур

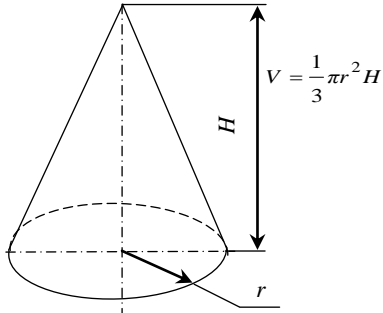
Параллелепипед



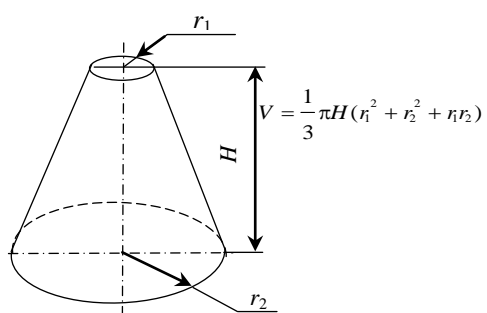
Цилиндр



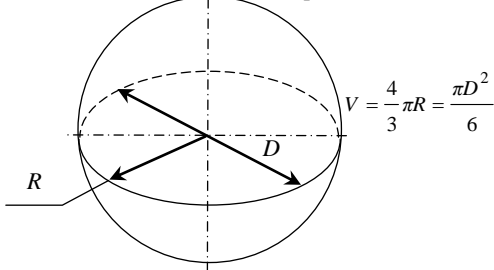
Конус



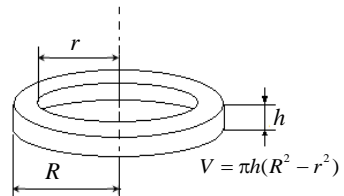
Усеченный конус



Шар



Кольцо



**Плотность некоторых веществ**

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
<i>Твердые вещества</i>			
Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Нихром	$8,3 \cdot 10^3$
Вольфрам	$1,93 \cdot 10^4$	Олово	$7,3 \cdot 10^3$
Воск пчелиный	$0,95 \cdot 10^3$	Парафин	$9,0 \cdot 10^2$
Графит	$2,1 \cdot 10^3$	Поваренная соль	$2,1 \cdot 10^3$
Железо, сталь	$7,8 \cdot 10^3$	Полоний	$9,28 \cdot 10^3$
Жир говяжий	$0,93 \cdot 10^3$	Пробка	$2,4 \cdot 10^2$
Золото	$1,93 \cdot 10^4$	Резина твердая	$1,2 \cdot 10^3$
Иридий	$2,24 \cdot 10^4$	Сахар	$1,6 \cdot 10^3$
Каучук	$0,94 \cdot 10^3$	Сало	$0,9 \cdot 10^3$
Кирпич	$1,8 \cdot 10^3$	Свинец	$1,14 \cdot 10^4$
Латунь	$8,5 \cdot 10^3$	Серебро	$1,05 \cdot 10^4$
Лед (0°C)	$0,9 \cdot 10^3$	Слюда	$2,8 \cdot 10^3$
Масло коровье	$0,91 \cdot 10^3$	Стекло	$2,5 \cdot 10^3$
Медь	$8,9 \cdot 10^3$	Уголь каменный	$1,4 \cdot 10^3$
Медный купорос	$2,2 \cdot 10^3$	Уран	$1,87 \cdot 10^4$
Чугун	$7,4 \cdot 10^3$	Эбонит	$1,2 \cdot 10^3$
<i>Жидкости</i>			
Ацетон	$0,79 \cdot 10^3$	Нитробензол	$1,2 \cdot 10^3$
Бензин	$7,2 \cdot 10^2$	Нитроглицерин	$1,6 \cdot 10^3$
Бензол	$9,0 \cdot 10^2$	Ртуть при 0°C	$1,36 \cdot 10^4$
Вода при 277 К	$1,0 \cdot 10^3$	Серная кислота	$1,8 \cdot 10^3$
Вода при 373 К	$0,958 \cdot 10^3$	Соляная кислота (38%)	$1,2 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,2 \cdot 10^3$	Спирт метиловый	$0,79 \cdot 10^3$
Молоко коровье	$1,028 \cdot 10^3$	Спирт этиловый	$7,9 \cdot 10^2$
Молоко цельное снятое	$1,032 \cdot 10^3$	Хлороформ	$1,5 \cdot 10^3$
Масло минеральное	$9,2 \cdot 10^2$	Толуол	$0,86 \cdot 10^3$
Масло оливковое	$9,2 \cdot 10^3$	Уксусная кислота	$1,05 \cdot 10^3$
Масло касторовое	$0,97 \cdot 10^3$	Эфир серный	$7,1 \cdot 10^2$
Масло машинное	$0,9 \cdot 10^3$		

## Окончание

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
<i>Газы при нормальных условиях (<math>P_0 = 1,013 \cdot 10^5</math> Па)</i>			
Азот	1,25	Криптон	3,74
Аммиак	0,77	Ксенон	5,85
Аргон	1,78	Метан	0,73
Кислород	1,43	Неон	0,9
Воздух	1,29	Светильный газ	0,73
Водород	0,09	Углекислый газ	1,98
Гелий	0,18	Хлор	3,21

## Приложение М

### Содержание соли в рассоле

Плотность при 20°C, кг/см <sup>3</sup>	Содержание поваренной соли в 100 мл рассола, %	Плотность при 20°C, кг/см <sup>3</sup>	Содержание поваренной соли в 100 мл рассола, %
1,0053	1	1,1008	14
1,0125	2	1,1065	15
1,0196	3	1,1162	16
1,0268	4	1,1241	17
1,0340	5	1,1319	18
1,0413	6	1,1398	19
1,0486	7	1,1478	20
1,0559	8	1,1559	21
1,0633	9	1,1639	22
1,0707	10	1,1722	23
1,0782	11	1,1804	24
1,0857	12	1,1888	25
1,0933	13	1,1972	26

**Показатель преломления некоторых материалов**

Материал	Показатель преломления
Воздух	1,0002926
Спирт	1,329
Янтарь	1,546
Аквамарин	1,577
Алмаз	2,417
Изумруд	1,56
Стекло	1,51
Водород (газ)	1,000140
Лед	1,309
Метанол	1,329
Нейлон	1,53
Кислород (газ)	1,000276
Кислород (жидкость)	1,221
Пластик	1,460
Кварц	1,544
Рубин	1,760

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Пояснительная записка.....	3
Методические указания по обработке результатов экспериментальных данных и определению погрешностей .....	4
Примерный тематический план лабораторных занятий.....	9
Задания лабораторных работ, теоретические сведения, вопросы для самоконтроля.....	10
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.....</b>	<b>10</b>
Лабораторная работа 1. Изучение методики определения линейных размеров по шкале с нониусом .....	10
Лабораторная работа 2. Изучение силы трения .....	14
Лабораторная работа 3. Определение модуля упругости (модуля Юнга) по изгибу стержня.....	20
Лабораторная работа 4. Определение момента инерции махового колеса.....	25
Лабораторная работа 5. Определение ускорения силы тяжести при помощи обратного маятника .....	29
Лабораторная работа 6. Определение длины волны и скорости распространения звуковых колебаний.....	39
<b>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА .....</b>	<b>45</b>
Лабораторная работа 7. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса .....	45
Лабораторная работа 8. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.....	50
Лабораторная работа 9. Определение влажности воздуха .....	57
Лабораторная работа 10. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха .....	63
Лабораторная работа 11. Определение плотности материалов .....	70
<b>ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....</b>	<b>75</b>
Лабораторная работа 12. Изучение электроизмерительных приборов .....	75
Лабораторная работа 13. Изучение закона Ома для постоянного и переменного тока.....	81
Лабораторная работа 14. Изучение электронного осциллографа, получение фигур Лиссажу .....	89
Лабораторная работа 15. Определение емкости конденсатора при помощи моста Сотти .....	94
<b>ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА .....</b>	<b>97</b>
Лабораторная работа 16. Определение показателя преломления твердых тел и линейных размеров малых объектов с помощью микроскопа.....	97
Лабораторная работа 17. Определение концентрации раствора спирта рефрактометром.....	102
Лабораторная работа 18. Изучение внешнего фотоэффекта .....	113
<b>ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА .....</b>	<b>120</b>
Лабораторная работа 19. Измерение мощности полевой эквивалентной дозы гамма-излучения .....	120
Лабораторная работа 20. Измерение удельной активности радионуклида цезия-137 в водном растворе дозиметром-радиометром РКС-107 .....	127
Список рекомендуемой литературы.....	132
Приложения.....	133

Учебное издание

**ФИЗИКА  
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ**

**Практикум  
для реализации содержания образовательных программ  
высшего образования I ступени**

Авторы-составители:

**Корецкая** Людмила Сергеевна  
**Черненко** Екатерина Викторовна

Редактор Е. В. Седро

Технический редактор И. А. Козлова

Компьютерная верстка Н. Н. Короедова

Подписано в печать 11.07.14. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага типографская № 1. Гарнитура Таймс. Ризография.

Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 8,60. Тираж 80 экз.

Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждение образования «Белорусский торгово-экономический  
университет потребительской кооперации».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 1/138 от 08.01.2014.

Просп. Октября, 50, 246029, Гомель.



**БЕЛКООПСОЮЗ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ТОРГОВО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ КООПЕРАЦИИ»**

---

Кафедра товароведения продовольственных товаров

# **ФИЗИКА ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ**

**Практикум  
для реализации содержания образовательных программ  
высшего образования I степени**

Гомель 2014